МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БЕЛОРУССКАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ НА ТРАНСПОРТЕ

МАТЕРИАЛЫ
XV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ,
ПОСВЯЩЕННОЙ ПЯТИЛЕТКЕ КАЧЕСТВА
(Гомель, 19–20 ноября 2026 г.)

Ч а с т ь 1

Под общей редакцией *Н. Н. КАЗАКОВА*

Гомель 2026

УДК 656.08
ББК 39.18
П78

Редакционная коллегия:

Н. Н. Казаков (отв. редактор), **Ю. Г. Самодум** (зам. отв. редактора),
А. А. Ерофеев (зам. отв. редактора), **Т. М. Маруняк** (отв. секретарь),
К. А. Бочков, Т. А. Власюк, И. А. Еловой, П. В. Ковтун, Е. Ф. Кудина, Д. В. Леоненко, Д. В. Ляпоров, В. Я. Негрей, А. В. Пигунов, А. Г. Ташкинов, С. Л. Шатров

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор **А. Ф. Бородин**
(Институт экономики и развития транспорта, г. Москва);
доктор технических наук, профессор **Ю. М. Плескачевский**
(член-корреспондент НАН Беларуси);
доктор технических наук, профессор **Н. К. Турсунов**
(Ташкентский государственный транспортный университет)

П78 **Проблемы** безопасности на транспорте : материалы XV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. пятилетке качества (Гомель, 19–20 ноября 2026 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Н. Н. Казакова. – Гомель : БелГУТ, 2026. – 541 с.

ISBN 978-985-891-286-4 (ч. 1)

Рассматриваются теоретические и организационно-технические основы обеспечения безопасности транспортных систем; пути повышения безопасности и надежности подвижного состава и систем электроснабжения; функциональная и информационная безопасность систем автоматики, телемеханики и связи; энергоэффективность и экологическая безопасность транспорта; вопросы безопасности транспортной инфраструктуры; надежности и безопасности зданий и сооружений; безопасности пассажирских перевозок; естественные науки в обеспечении безопасности транспортных систем; экономическая безопасность транспортных систем; транспортная безопасность при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций; тенденции развития образования в системе обеспечения кадровой безопасности транспортного комплекса.

Для ученых, преподавателей учебных заведений транспортного профиля, научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных организаций, предприятий и учреждений транспорта и строительства.

УДК 656.08
ББК 39.18

ISBN 978-985-891-286-4 (ч. 1)
ISBN 978-985-891-285-7

© Оформление. БелГУТ, 2026

УВАЖАЕМЫЕ УЧАСТНИКИ КОНФЕРЕНЦИИ!

От имени организационного комитета XV Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» приветствую вас, желаю успешной работы, плодотворного обсуждения путей решения вопросов обеспечения безопасности на транспорте.

Конференция посвящена пятилетке качества. Повышение качества производимой продукции предполагает внедрение современных технологий производства, форм контроля качества и организации труда, рационализаторских инициатив, а также высокую мотивацию сотрудников.

Одним из ключевых направлений по повышению эффективности производства и качества жизни является поддержание высокого уровня безопасности.

Активный диалог между наукой и производством по проблемам безопасности позволяет сформулировать новые подходы и найти эффективные решения актуальных задач безопасности транспортного комплекса.

Проведение научно-исследовательских работ по транспортной тематике всегда являлось одним из приоритетных направлений деятельности ученых и специалистов Белорусского государственного университета транспорта. В тесном сотрудничестве со специалистами-производственниками решаются вопросы экономической, энергетической, экологической безопасности транспортных систем, надежности и безопасности подвижного состава, транспортной инфраструктуры.

Выражаю уверенность, что обмен мнениями по этим и другим вопросам, активное сотрудничество специалистов в различных направлениях деятельности позволят найти взвешенное, комплексное решение многих важнейших задач в области безопасности на транспорте.

Хочется отметить поддержку и весомую помощь, которую оказывают Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, Белорусская железная дорога в проведении ставшей уже традиционной конференции.

В очной и дистанционной формах работы 11 секций принимает участие более 450 докладчиков. Большой интерес к конференции проявили ученые и специалисты из Беларуси, России, Узбекистана, Казахстана, Китая, Греции. Проведение конференции мы рассматриваем как возможность ознакомить участников с творческими достижениями специалистов и ученых учреждений высшего образования и научно-исследовательских институтов, установить новые контакты и оказать помощь транспортным и другим организациям в решении различных научно-технических задач.

Благодарю вас за участие в работе конференции и желаю всем успехов в решении научных и производственных задач, благополучия, крепкого здоровья, безопасного настоящего и будущего!

НИКОЛАЙ КАЗАКОВ,
ректор Белорусского государственного университета транспорта,
председатель организационного комитета конференции

1 БЕЗОПАСНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Посвящается 90-летию Ярошевича Валентина Петровича

НАУЧНОЕ И ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ ПРОФЕССОРА В. П. ЯРОШЕВИЧА

В 2026 г. исполняется 90 лет со дня рождения Валентина Петровича Ярошевича – кандидата технических наук, профессора, почетного железнодорожника, заслуженного работника образования Республики Беларусь. Валентин Петрович – педагог, ученый-эксплуатационник, талантливый организатор, он внес вклад в теорию совершенствования местной работы на станциях и участках, развитие университета и укрепление его связей с Белорусской железной дорогой [1]. Автор более 200 научных работ и учебно-методических пособий.



Родился 23 июня 1936 г. в д. Толково Брестской области. После Брестского техникума железнодорожного транспорта (1957 г.) работал дежурным по станции, в 1962 г. с отличием окончил Белорусский институт железнодорожного транспорта и был направлен на станцию Брест-Северный. В 1964–1967 гг. учился в аспирантуре и под руководством профессора И. Г. Тихомирова досрочно защитил кандидатскую диссертацию [2].

Дальнейший путь В. П. Ярошевича связан с родным вузом: руководитель научно-исследовательской лаборатории (с 1978 г.); доцент (1969 г.), профессор (1990 г.) кафедры «Эксплуатация железных дорог», декан эксплуатационного факультета (1980–1987 гг.), проректор по учебной работе (с 1987 г.), ректор университета (1997–2000 гг.) [1].

Научные интересы Валентина Петровича – ученика профессора И. Г. Тихомирова и представителя его научной школы [3] – лежали в области организации местной работы участков, станций и узлов. Он теоретически обосновал параметры технического оснащения и технологии работы грузовых дворов сортировочных станций, разработал теорию оптимальной мощности парков и грузовых фронтов на основе теории надежности, развил теорию взаимодействия станций и подъездных путей. В 1980-х гг. под его руководством разработаны и реализованы предложения по концентрации грузовой работы на опорных станциях и закрытию малодеятельных станций.

Много внимания уделял методическому обеспечению учебного процесса: был соавтором коллективных трудов кафедры, подготовил учебные пособия по эксплуатационной работе узлов и направлений и учебное пособие «Транспорт. Общий курс» (2001 г.) с грифом Министерства образования Республики Беларусь.

Будучи ректором, он укрепил связи университета с Белорусской железной дорогой, возобновил работу Научно-технического совета дороги; созданы Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта и Научный центр комплексных транспортных проблем, при его непосредственном участии разработаны «Программа развития Белорусской железной дороги до 2010 г.» и «Комплексный прогноз научно-технического прогресса на Белорусской железной дороге до 2020 г.».

Валентин Петрович награжден знаком «Почетному железнодорожнику» (1983 г.), орденом «Дружбы народов» (1986 г.). Осуществил детскую мечту стать железнодорожником, подготовил не одну плеяду инженеров-эксплуатационников и основал династию, которую продолжают его сыновья и внук.

А. А. Ерофеев

УДК 656.08

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК КЛЮЧЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ БЕЗОПАСНОСТИ НА ТРАНСПОРТЕ

Д. А. ГАЕВ, В. В. ПЕТРУСЕВИЧ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Транспорт играет огромную роль в жизни современного общества. Ежедневно миллионы людей используют автомобили, автобусы, поезда, самолёты и другие виды транспорта для поездок на работу, учёбу, отдыха и перевозки грузов. Развитие транспортной системы делает жизнь людей удобнее и способствует экономическому развитию государств. Однако одновременно транспорт является источником повышенной опасности [1–3].

Аварии и чрезвычайные происшествия могут происходить по различным причинам: из-за технических неисправностей, неблагоприятных погодных условий, недостатков транспортной инфраструктуры, нарушений правил и особенно часто вследствие человеческого фактора. Поэтому обеспечение безопасности на транспорте сегодня невозможно представить без сочетания ответственности человека и современных технических средств.

Одной из главных проблем транспортной безопасности остаётся человеческий фактор, под которым понимается совокупность действий и ошибок человека, способных повлиять на безопасность движения. На автомобильном транспорте наиболее распространёнными причинами опасных ситуаций являются превышение скорости, несоблюдение дистанции, неправильный манёвр, отвлечение внимания и нарушение правил дорожного движения. Особую опасность представляет использование мобильного телефона во время управления транспортным средством. Даже кратковременное отвлечение внимания может привести к тому, что водитель не заметит препятствие или не успеет вовремя отреагировать на изменение дорожной ситуации.

Серьёзную угрозу также создаёт управление транспортом в состоянии алкогольного или наркотического опьянения. В таком состоянии снижается скорость реакции, ухудшается координация движений и способность правильно оценивать дорожную обстановку. Не менее важной проблемой является усталость. Для профессиональных водителей, машинистов, пилотов и других работников транспортной сферы переутомление может стать причиной снижения концентрации внимания и ошибок. Поэтому организация режима труда и отдыха сотрудников является важной частью транспортной безопасности. Таким образом, повышение безопасности требует не только совершенствования техники, но и формирования ответственного поведения всех участников транспортного процесса.

Развитие технологий позволяет существенно снизить влияние человеческих ошибок. В современных транспортных средствах применяются системы, которые помогают водителю контролировать дорожную ситуацию и своевременно реагировать на опасность. К таким технологиям относятся системы автоматического экстренного торможения, контроля полосы движения, предупреждения о столкновении и контроля состояния водителя. Например, если автомобиль приближается к препятствию, система может предупредить водителя или самостоятельно активировать торможение. Подобные технологии особенно полезны в ситуациях, когда человек из-за усталости или невнимательности не успевает отреагировать самостоятельно. Большое значение имеют системы видеонаблюдения и автоматического контроля. Камеры позволяют фиксировать нарушения правил дорожного движения, контролировать состояние транспортных объектов и повышать безопасность пассажиров. На железнодорожном транспорте используются автоматизированные системы управления движением, позволяющие контролировать скорость поездов и предотвращать некоторые опасные ситуации.

Отдельное направление – развитие беспилотных транспортных средств. Автомобили, поезда и другие виды транспорта постепенно получают возможность выполнять часть операций без непосредственного участия человека. Основным преимуществом такого подхода является снижение количества ошибок, связанных с невнимательностью или неправильной оценкой ситуации [4, 5].

Однако полная автоматизация также создаёт новые риски. Техническая система может выйти из строя, неправильно распознать объект или столкнуться с программной ошибкой. Кроме того, современные транспортные системы становятся зависимыми от компьютерных сетей, что делает актуальным вопрос кибербезопасности. Для повышения уровня безопасности необходимо одновременно работать по нескольким направлениям.

Во-первых, следует совершенствовать подготовку водителей и других работников транспортной сферы. Обучение должно включать не только знание правил, но и практические навыки поведения в нестандартных и чрезвычайных ситуациях.

Во-вторых, необходимо регулярно контролировать техническое состояние транспортных средств. Даже самые современные системы безопасности не смогут полностью защитить пассажиров, если транспорт эксплуатируется с неисправностями.

В-третьих, важно развивать транспортную инфраструктуру. Качественные дороги, освещение, дорожные знаки, пешеходные переходы, ограждения и системы регулирования движения позволяют значительно уменьшить вероятность возникновения аварийных ситуаций.

В-четвёртых, необходимо активно внедрять современные технологии, но при этом не забывать о возможных технических и кибернетических угрозах. Автоматизированные системы должны проходить регулярное тестирование и техническое обслуживание, а их программное обеспечение – быть защищено от несанкционированного доступа.

Наконец, важную роль играет воспитание культуры безопасного поведения. Каждый человек, находящийся на дороге или пользующийся общественным транспортом, должен осознавать свою ответственность. Соблюдение правил дорожного движения, использование ремней безопасности, внимательность и отказ от опасного поведения способны предотвратить многие происшествия.

Таким образом, безопасность современного транспорта напрямую зависит от взаимодействия человека и технологий. Несмотря на стремительное развитие автоматизированных систем, полностью исключить человеческий фактор пока невозможно. Поэтому главной задачей является не замена человека технологиями, а создание такой системы, в которой технические средства помогают человеку принимать правильные решения и предотвращают возможные ошибки.

В будущем транспорт будет становиться всё более интеллектуальным и автоматизированным. Однако вместе с технологическим прогрессом должны развиваться ответственность людей, качество подготовки специалистов и системы контроля.

Список литературы

1 **Гуськов, А. А.** Безопасность транспортных систем : учеб. пособие / А. А. Гуськов. – М. : Академия, 2021. – С. 23–41.
2 **Лукьянов, В. В.** Безопасность дорожного движения / В. В. Лукьянов. – М. : Транспорт, 2020. – С. 42–51.
3 **Бабков, В. Ф.** Дорожные условия и безопасность движения / В. Ф. Бабков. – М. : Транспорт, 2019. – С. 10–15.
4 Правила дорожного движения Российской Федерации. – М. : Эксмо, 2024. – С. 23–32.
5 **Коноплянко, В. И.** Организация и безопасность движения : учеб. / В. И. Коноплянко. – М. : Высш. шк., 2020. – С. 81–99.

УДК 656.2.08(476)

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА БЕЛАРУСИ: ВЫЗОВЫ И РЕШЕНИЯ

Е. Л. ГИЛЕВСКИЙ, А. А. АСАДЧИЙ, В. В. ПЕТРУСЕВИЧ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В период с 2020 по 2026 год вопросы безопасности на железнодорожном транспорте в Республике Беларусь приобрели особую актуальность. Железная дорога остаётся ключевой транспортной артерией страны: она обеспечивает значительную часть грузовых перевозок, связывает регионы, поддерживает транзит между Востоком и Западом. Именно поэтому любые угрозы, связанные с безопасностью, воспринимаются не просто как технические проблемы, а как вызовы, затрагивающие экономику, устойчивость транспортной системы и повседневную жизнь людей.

За последние годы железнодорожная отрасль Беларуси пережила серьёзные изменения. С одной стороны, активно внедряются цифровые технологии, модернизируется инфраструктура, обновляется подвижной состав. С другой – растёт спектр рисков, которые требуют внимания. В 2020–2026 годах в мире усилились тенденции, связанные с киберугрозами, вмешательством в работу транспортных систем, а также с человеческим фактором, который остаётся одной из главных причин инцидентов. Беларусь не является исключением: железная дорога сталкивается с теми же вызовами, что и другие страны, но решает их с учётом национальной специфики.

Одной из ключевых проблем остаётся обеспечение физической безопасности объектов железнодорожной инфраструктуры. Станции, перегоны, мосты, сортировочные горки – всё это объекты повышенной опасности, где любое нарушение может привести к серьёзным последствиям. В период 2020–2026 годов в Беларуси усилилось внимание к предотвращению актов незаконного вмешательства. Это связано как с общими мировыми тенденциями, так и с отдельными инцидентами, которые показали, что железная дорога может стать объектом целенаправленного воздействия. В ответ были усилены меры контроля, расширены зоны охраны, внедрены новые регламенты по досмотру грузов и мониторингу состояния инфраструктуры.

Отдельного внимания заслуживает вопрос технической надёжности. Беларусь активно модернизирует железнодорожную сеть, но значительная часть инфраструктуры была построена десятилетия назад. Это означает, что износ путей, стрелочных переводов, мостов и контактной сети остаётся фактором риска. В последние годы внедряются системы диагностики, которые позволяют отслеживать состояние объектов в режиме реального времени. Однако переход к полностью цифровой модели требует времени, инвестиций и подготовки специалистов. В 2020–2026 годы именно сочетание старой инфраструктуры и новых технологий стало одним из главных вызовов: необходимо не просто обновлять объекты, но и интегрировать их в единую цифровую систему управления.

Цифровизация железной дороги открыла новые возможности, но одновременно создала новые угрозы. По данным международных организаций, количество кибератак на транспортные системы в мире выросло в несколько раз. Железнодорожный транспорт стал одной из наиболее уязвимых сфер, поскольку современные системы управления движением, сигнализации и логистики работают через цифровые каналы. Беларусь активно внедряет интеллектуальные системы, автоматизированные комплексы и цифровые платформы для управления перевозками. Но это означает, что защита от киберугроз становится не менее важной, чем защита от физических рисков. В 2024–2026 годах усилилось внимание к вопросам кибербезопасности: проводятся учения, внедряются новые протоколы защиты, создаются специализированные подразделения.

Важной проблемой остаётся человеческий фактор. Несмотря на автоматизацию, железная дорога по-прежнему зависит от профессионализма машинистов, диспетчеров, работников станций и служб безопасности. Ошибки, усталость, недостаток подготовки – всё это может привести к инцидентам. В последние годы Беларусь уделяет большое внимание обучению персонала, внедрению симуляторов, повышению культуры безопасности. Но рост нагрузки, увеличение объёмов перевозок и появление новых технологий требуют постоянного обновления подходов. Человек должен не просто выполнять инструкции, но и понимать логику цифровых систем, уметь работать с большими потоками данных и быстро реагировать на нестандартные ситуации. Отдельным вызовом стало развитие международного транзита. Беларусь находится на пересечении крупных транспортных коридоров, и это делает железную дорогу важным элементом международной логистики. Рост транзитных перевозок увеличивает нагрузку на инфраструктуру и требует более высокого уровня безопасности. В период 2020–2026 годов активно обсуждались вопросы гармонизации стандартов, обмена данными, совместных мер по предотвращению инцидентов. Международное сотрудничество стало ключевым фактором устойчивости: безопасность железной дороги невозможно обеспечить в рамках одной страны, если поезда проходят через десятки границ.

Таким образом, проблемы безопасности на железнодорожном транспорте Беларуси в 2020–2026 годах можно охарактеризовать как многослойные. Это сочетание физической защиты объектов, технической надёжности, цифровой безопасности, человеческого фактора и международного взаимодействия. Железная дорога переживает период трансформации, и именно в такие моменты система становится наиболее уязвимой. Но одновременно это время возможностей: внедрение современных технологий, обновление инфраструктуры, повышение квалификации персонала и развитие международного сотрудничества создают основу для новой модели безопасности. Главная задача – сохранить баланс между развитием и защитой, чтобы железная дорога оставалась надёжной, устойчивой и безопасной для людей и экономики страны.

УДК 625.7

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ КАК ОСНОВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Д. М. ГОНЧАРОВА
ОАО «ДСТ № 2», филиал ДСУ № 17, г. Гомель, Республика Беларусь

Безопасность автомобильных дорог определяется не только условиями их эксплуатации, но и качеством материалов и работ, выполняемых при строительстве, ремонте и содержании дорожной инфраструктуры. В процессе эксплуатации дорожная конструкция подвергается воздействию транспортных нагрузок, атмосферных факторов и изменениям влажностного режима. Поэтому своевременная диагностика и мониторинг состояния дороги необходимы для получения объективной информации о качестве и надежности конструкции, а также для предупреждения развития дефектов.

Диагностика автомобильных дорог представляет собой комплекс мероприятий по сбору, обработке и оценке информации о фактическом состоянии объекта. В Республике Беларусь порядок выполнения диагностики устанавливается техническими нормативными документами, а результаты обследований используются для оценки транспортно-эксплуатационного состояния дорог и определения дальнейших мероприятий. При этом важным условием достоверности диагностики является получение качественных исходных данных, в том числе результатов лабораторных испытаний материалов и грунтов.

Особое значение имеет лабораторный контроль грунтов и дорожно-строительных материалов, поскольку их свойства непосредственно связаны с работоспособностью дорожной конструкции. В зависимости от объекта и задачи контроля определяются соответствующие показатели, характеризующие качество материала. Получение фактического значения позволяет оценить соответствие материала установленным требованиям и своевременно выявить несоответствия, которые могут повлиять на последующие технологические операции и эксплуатационную надежность дороги.

Достоверность результатов зависит не только от применяемого оборудования и методики испытания, но и от правильной организации отбора и подготовки образцов. Полученный образец должен быть идентифицирован и связан с конкретным объектом и участком выполнения работ. Важное значение имеют соблюдение условий подготовки, последовательности проведения испытания и требований к оформлению полученных результатов. Такой порядок обеспечивает возможность объективного анализа и позволяет при выявлении отклонения определить область его распространения.

Результаты лабораторных испытаний оформляются в установленном виде и используются как часть технической и исполнительной документации. Протоколы, акты и журналы позволяют фиксировать фактические показатели, подтверждать проведение контрольных мероприятий и сохранять сведения о качестве выполненных работ. Документирование результатов имеет не только отчетное значение: накопленная информация может использоваться при приемке, анализе выявленных несоответствий, проведении повторных исследований и принятии решений о необходимости дополнительных мероприятий.

Важным этапом является оценка соответствия фактических результатов установленным требованиям. Полученный показатель должен рассматриваться с учетом нормативного значения, установленного для конкретного материала или вида работ. При соответствии требованиям результат подтверждает качество контролируемого объекта. При отклонении необходимо определить возможную причину и установить дальнейшие действия, например, проведение повторного испытания, дополнительного отбора образцов, уточнение условий выполнения работ или применение предусмотренных технологических мероприятий.

Эффективность диагностики повышается при комплексном использовании результатов различных видов контроля. Лабораторные данные могут рассматриваться совместно с информацией о выполненных технологических операциях, результатами визуального обследования и другими данными о состоянии объекта. Такой подход позволяет оценивать не отдельный показатель, а взаимосвязь качества материалов и условий выполнения работ с фактическим состоянием дорожной конструкции. В результате повышается обоснованность инженерных решений, принимаемых по итогам контроля.

Современный мониторинг предполагает не только получение разовых результатов, но и наблюдение за изменением контролируемых показателей во времени. Повторные исследования позволяют сопоставлять данные, полученные на разных этапах, выявлять тенденции и определять неблагоприятные изменения до того, как они приведут к существенному ухудшению состояния дороги. Таким образом, мониторинг дополняет диагностику и позволяет переходить от фиксации уже возникших проблем к их своевременному предупреждению.

Цифровые средства обработки информации расширяют возможности лабораторного контроля. Результаты испытаний могут систематизироваться по объектам, участкам, видам материалов и датам проведения работ. Электронное хранение и обработка данных упрощают поиск ранее полученных результатов, позволяют быстрее сравнивать повторные исследования и повышают прослеживаемость контроля. При этом цифровизация должна рассматриваться как инструмент повышения эффективности работы с результатами испытаний, а не как замена непосредственного лабораторного контроля.

Перспективным направлением совершенствования диагностики является комплексное использование результатов обследований и испытаний в соответствии с действующими в Республике Беларусь нормативно-методическими документами [3, 4]. Учебные материалы БНТУ по диагностике автомобильных дорог предусматривают оценку состояния дорожных объектов и применение методов измерения транспортно-эксплуатационных характеристик [1, 2]. Такое сочетание результатов контроля позволяет повысить достоверность оценки состояния дороги и обосновать необходимость дальнейших мероприятий по обеспечению качества и безопасности.

В конечном итоге цель диагностики и мониторинга заключается не только в фиксации текущих показателей, но и в обеспечении возможности своевременного инженерного реагирования. Чем раньше выявлено несоответствие, тем больше возможностей для его устранения до накопления связанных с ним дефектов. Поэтому лабораторный контроль, правильное документирование результатов и последующий анализ полученной информации должны рассматриваться как взаимосвязанные элементы общей системы обеспечения качества и безопасности автомобильных дорог.

Таким образом, современные методы диагностики и мониторинга состояния автомобильных дорог представляют собой комплексную систему, в которой лабораторный контроль занимает важное место. Получение достоверных результатов испытаний, правильный отбор и подготовка образцов, оценка соответствия нормативным требованиям, документирование и последующий анализ данных позволяют своевременно выявлять несоответствия и принимать обоснованные решения. Систематическое проведение контрольных мероприятий способствует предупреждению накопления дефектов, повышению надежности дорожной конструкции и обеспечению безопасности автомобильной дороги в процессе эксплуатации.

Список литературы

1 **Соболевская, С. Н**. Диагностика автомобильных дорог : пособие для студентов специальности 1-70 03 01 «Автомобильные дороги» / С. Н. Соболевская, Е. П. Ходан. – Минск : БНТУ, 2020. – 72 с.

2 **Леонович, И. И.** Диагностика автомобильных дорог : учеб. пособие. / И. И. Леонович, С. В. Богданович, И. В. Нестерович. – Минск : Новое знание; М. : ИНФРА-М, 2011. – 350 с. – URL: https://elima.ru/books/?id=5176&utm_source (дата обращения: 10.09.2026).

3 Инструкция о порядке диагностики автомобильных дорог общего пользования : постановление М-ва трансп. и коммуникаций Республики Беларусь от 07.12.2004 № 48 (в ред. постановления от 17.06.2019 № 32) // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/novosti/novosti-pravo-by/2019/july/37535/ (дата обращения: 10.09.2026).

4 СТБ 1566-2005. Дороги автомобильные. Методы испытаний. – Введ. 01.07.2026. – Минск : Минскстройархитектуры, 2006. – 33 с.

УДК 656.212:656.25

РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ МЕСТНОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЗЛОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Д. Ф. ЖЛОБА, Е. А. ТЕРЕЩЕНКО
Гомельский колледж – филиал Белорусского государственного университета транспорта

Современное развитие железнодорожного транспорта характеризуется повышением требований к эффективности, устойчивости и безопасности перевозочного процесса. Для железнодорожных

узлов эта задача имеет особое значение, поскольку в них концентрируются прием и отправление поездов, переработка вагонопотоков, формирование и расформирование составов, выполнение грузовых операций, подача и уборка вагонов и значительный объем маневровой работы. В этих условиях местная работа становится одним из наиболее чувствительных элементов технологии станции: нарушение последовательности операций быстро отражается на занятости путей, загрузке горловин, времени простоя вагонов и возможности выполнения последующих маневров.

Важное значение для развития теоретических подходов к организации эксплуатационной работы имеют труды профессора Валентина Петровича Ярошевича [2, 3]. Идеи рационального распределения вагонопотоков, оптимального использования ресурсов и сокращения необоснованных перемещений сохраняют значение и в современных условиях. Однако цифровизация позволяет дополнить традиционную оптимизацию оценкой будущего состояния технологического процесса. Если раньше решение в значительной степени принималось исходя из текущей ситуации, то современные вычислительные средства дают возможность заранее сравнить несколько вариантов работы станции.

Цель статьи заключается в развитии теоретического подхода к обеспечению безопасности при организации местной работы железнодорожных узлов посредством объединения классических принципов оптимизации эксплуатационной работы с оценкой прогнозируемого риска и цифровым моделированием.

Местная работа и эксплуатационная безопасность. Местная работа представляет собой совокупность операций, связанных с обслуживанием грузовых объектов, формированием и расформированием местных поездов, подачей и уборкой вагонов и их передачей между элементами железнодорожного узла. Ее качество определяется не отдельной операцией, а согласованностью всего технологического процесса. Несвоевременная уборка вагонов, например, может привести к занятости пути, задержке последующей подачи и необходимости изменять первоначальную последовательность маневров.

При возникновении подобных отклонений формируется цепочка взаимосвязанных последствий: нарушение технологического плана вызывает увеличение времени обработки, накопление вагонов и рост числа маневровых операций; увеличение маневровой активности повышает загрузку станционных элементов и усложняет согласование маршрутов. Поэтому сокращение необоснованных маневров является не только способом повышения производительности, но и одним из направлений снижения эксплуатационного риска.

При этом речь не должна идти о механическом уменьшении количества маневров. Необходимые операции должны выполняться в полном объеме, а оптимизации подлежит именно их последовательность и организация. Рациональным следует считать такой вариант работы, при котором обеспечивается требуемый объем местной работы при минимально необходимом использовании путей, маневровых локомотивов и времени.

Теоретическая оценка эксплуатационного риска. В качестве интегрального показателя прогнозируемого эксплуатационного риска в рамках предлагаемого подхода введем показатель R [1]. Его можно представить, как функцию интенсивности маневровой работы, количества враждебных маршрутов, степени загрузки станционных элементов и продолжительности технологических операций:

$$R = f(I_м, N_к, K_з, T_о), \quad (1)$$

где $I_м$ – интенсивность маневровой работы; $N_к$ – частота возникновения случаев враждебности маршрутов; $K_з$ – степень загрузки станционных элементов; $T_о$ – продолжительность технологических операций.

Интенсивность маневровой работы может определяться отношением количества выполненных операций к продолжительности рассматриваемого периода:

$$I_м = \frac{N_м}{T}, \quad (2)$$

где $N_м$ – количество маневровых операций; T – продолжительность периода.

Однако абсолютного количества маневров недостаточно для оценки состояния станции. Одинаковое число операций может выполняться при различных уровнях загрузки горловин и разной степени взаимного влияния маршрутов.

В качестве исходной теоретической зависимости может использоваться выражение

$$R = \alpha I_{\text{м}}^{*} + \beta N_{\text{к}}^{*} + \gamma K_{\text{з}}^{*} + \delta T_{\text{о}}^{*}, \tag{3}$$

где $I_{\text{м}}^{*}, N_{\text{к}}^{*}, K_{\text{з}}^{*}, T_{\text{о}}^{*}$ – нормированные показатели; α, β, γ, δ – весовые коэффициенты, определяемые при последующей калибровке модели.

Такая модель требует последующей проверки и калибровки по фактическим данным работы конкретного узла. Ее принципиальное значение состоит в другом: безопасность предлагается учитывать уже на стадии выбора технологического варианта, а не только после возникновения нарушения.

Оптимизация местной работы с учетом риска. Традиционно эффективность местной работы может оцениваться через суммарное время маневров и межоперационные простои вагонов. В простейшем виде целевая функция записывается следующим образом:

$$F_{\text{о}} = T_{\text{м}} + T_{\text{п}} \rightarrow \min, \tag{4}$$

где $T_{\text{м}}$ – суммарное время маневровой работы; $T_{\text{п}}$ – межоперационное время простоя вагонов.

Такая постановка отражает технологическую эффективность, но не показывает, насколько устойчивым является выбранный вариант при высокой загрузке станции. Поэтому целевую функцию целесообразно расширить. Таким образом, концептуальная многокритериальная целевая функция примет вид

$$F = \alpha I_{\text{м}}^{*} + \beta T_{\text{п}}^{*} + \gamma R \rightarrow \min, \tag{5}$$

где $I_{\text{м}}^{*}$, $T_{\text{п}}^{*}$ и R приведены к сопоставимому масштабу.

В этом случае оптимальным является не обязательно самый быстрый вариант. Предпочтение получает решение, которое обеспечивает требуемую производительность при допустимом уровне риска. Дополнительным условием может быть ограничение

$$R \leq R_{\text{доп}}, \tag{6}$$

где $R_{\text{доп}}$ характеризует допустимый уровень прогнозируемого риска.

Такой подход особенно важен для станций, на которых одновременно выполняется несколько видов местной работы. При высокой плотности операций даже небольшое изменение времени одной подачи или уборки способно вызвать цепную реакцию задержек. Следовательно, устойчивость технологического процесса должна рассматриваться как самостоятельный критерий его качества.

Цифровое моделирование и прогнозирование. Практическая реализация предлагаемой концепции связана с развитием автоматизированных систем управления станцией и цифрового моделирования технологического процесса. Цифровая модель должна отражать инфраструктуру станции, состояние путей и стрелочных переводов, положение поездов и маневровых локомотивов, расположение вагонов, планируемые подачи и уборки, а также технологические ограничения.

Основное преимущество такой модели заключается в возможности предварительного проигрывания плана работы. До начала операций можно проверить, не возникнет ли враждебность маршрутов, не приведет ли выбранная последовательность к чрезмерной загрузке горловины и не образуется ли очередь на выполнение местных операций. В результате оперативный работник получает возможность сравнить несколько вариантов и выбрать тот, который обеспечивает приемлемое сочетание времени и безопасности.

Особенно перспективен переход от оценки только текущего состояния к прогнозу ближайшего развития ситуации. Если система располагает данными о продолжительности предыдущих операций, задержках подачи и уборки, загрузке путей и повторяющихся отклонениях, эти сведения могут использоваться для оценки устойчивости планируемой работы. При этом цифровая система должна оставаться инструментом поддержки принятия решений: окончательное решение о выполнении операции принимается ответственным работником в соответствии с действующими требованиями безопасности.

Развитие идей В. П. Ярошевича в условиях цифровизации. Положения классической школы эксплуатации железных дорог не теряют значения при переходе к цифровым технологиям. Напротив, цифровые инструменты позволяют реализовать их более полно. Рациональное распределение

вагонопотоков может быть дополнено оперативным моделированием, сокращение необоснованных перемещений – автоматизированным сравнением вариантов маневровой работы, а согласование операций – единой моделью станции.

Принципиально меняется и сам характер планирования. При традиционном подходе специалист определяет наиболее рациональный вариант, опираясь на нормативы, расчеты и опыт. При наличии цифровой модели становится возможным проверить несколько вариантов и оценить их последствия еще до начала работы. Таким образом, цифровизация не заменяет теорию организации эксплуатационной работы, а расширяет ее возможности, переводя часть расчетных процедур из ручного режима в режим автоматизированного анализа.

Обеспечение безопасности при организации местной работы железнодорожных узлов непосредственно связано с качеством организации технологического процесса. Увеличение необоснованных маневров, нерациональное распределение вагонопотоков и чрезмерная загрузка отдельных станционных элементов способны приводить к росту эксплуатационного риска. Поэтому при оптимизации местной работы необходимо учитывать не только продолжительность операций и простои вагонов, но и устойчивость технологического процесса.

Предложенная структура целевой функции F позволяет объединить показатели технологической эффективности и прогнозируемого риска. Данный подход развивает классические положения организации эксплуатационной работы, связанные с рациональным использованием ресурсов и сокращением необоснованных операций.

Перспективным направлением является применение цифровых моделей станции для предварительного анализа вариантов технологического плана. Их использование позволяет выявлять потенциальную враждебность, оценивать загрузку станционных элементов и выбирать более устойчивый вариант организации местной работы. Дальнейшее исследование должно быть связано с проверкой предложенной модели на реальных данных конкретного железнодорожного узла и определением параметров зависимости риска от характеристик технологического процесса.

Список литературы

1 **Шубинский, И. Б.** Надежность, риски, безопасность систем управления на железнодорожном транспорте / И. Б. Шубинский, Е. Н. Розенберг, А. В. Бочков. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 416 с.

2 **Ярошевич, В. П.** Оптимизация эксплуатационной работы полигонов сети методами линейного программирования : учебное пособие / В. П. Ярошевич. – Гомель : БелИИЖТ, 1982. – 34 с.

3 **Ярошевич, В. П.** Транспорт. Общий курс : учеб. пособие для студентов транспортных специальностей вузов / В. П. Ярошевич, М. И. Шкурин. – Гомель : БелГУТ, 2001. – 389 с.

УДК 614.846

ТИПОВЫЕ НЕИСПРАВНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА СОВРЕМЕННЫХ ПОЖАРНЫХ АВТОЛЕСТНИЦАХ

С. В. ИВАНОВ
Филиал «Институт профессионального образования»
Университета гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, г. Гомель

Современная пожарная высотная техника – это сложные механизмы, где главным образом электронные системы контролируют безопасность ее эксплуатации, работу датчиков, включенных в систему блокировок и сигнализаций, выдачу информационных и предупредительных сигналов для водителя-оператора, и в конечном счете предотвращают возможное опрокидывание и иные поломки пожарного автомобиля [1].

Большинство современных пожарных автолестниц (далее – АЛ) зачастую оборудованы полноценной вычислительной системой (компьютером), которая обеспечивает и контролирует работу всех имеющихся датчиков системы безопасности. Сигналы и сообщения, выдаваемые датчиками, а также текущие параметры работы АЛ выводятся на мониторы, которыми оборудованы пульты управления. Всё это позволяет водителю-оператору осуществлять более качественный контроль за автомобилем в процессе осуществления работ и оперативно реагировать на нештатные ситуации.

Однако нельзя отрицать, что наличие развитой системы электрооборудования может негативно отразиться на ремонтопригодности. Сбой работы какого-либо одного датчика может привести к тому, что без его показаний компьютер не сможет сформировать цельной картины, и, как следствие, весь автомобиль может «уйти в аварию».

В данной статье в качестве примера будут рассмотрены пожарные автолестницы производства ООО «Завод современной пожарной техники», г. Орша, Республика Беларусь [2, 3] (рисунок 1).

а) *б)*

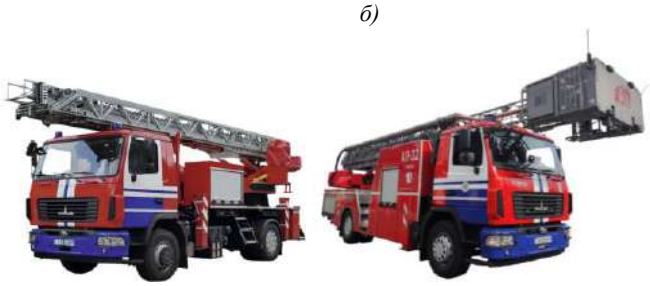


Рисунок 1 – АЛ-30(5340С2)300Х И1 (*а*) и АЛ-32(5340С3)300Х И2 (*б*)

Проблемы, описанные ниже, в период с 2025 по 2026 год были характерны для АЛ именно этого производителя.

Дополнительное электрооборудование на данных АЛ выстроено следующим образом: за работу каждого контура отвечают, в числе прочих элементов, отдельные программируемые реле ПР-200 марки «ОВЕН». При неисправностях, связанных с данными реле, на пульт управления выводятся сообщения об обрыве связи с ПР-200 соответствующего контура (ПУВО – пульты управления выносными опорами, ОПУ – основной пульт управления) (рисунок 2).



Рисунок 2 – Информационные сообщения об обрыве связи с ПР-200 на мониторах

Для определения характера неисправности необходимо снять заднюю крышку основного пульта управления и обратить внимание на экраны ПР-200. По сути, здесь возможны два варианта: отсутствие питания на ПР-200 и проблемы с программным обеспечением (рисунок 3). В первом случае проблемы могут быть не с самим реле, а с проводкой, токопереходом либо предохранителем, во втором случае единственное решение – замена программного обеспечения.

а) *б*)



Рисунок 3 – Неисправности программируемых реле ПР-200: отсутствие питания:
а – пустой экран и сбой программного обеспечения *б* – соответствующая надпись на экране

Помимо вышеописанных программируемых реле ПР-200 могут наблюдаться неисправности модуля расширения для ПР-200–МВ110-224.1ТД, который принимает сигналы от датчиков стрелы и

передает их на реле. При обрыве связи с данным модулем на экран монитора выводится соответствующее сообщение (рисунок 4). При этом в левой части рисунка 4 причиной была не неисправность модуля, на что указывает сообщение, а окислившиеся контакты электрического разъема между люлькой и стрелой.



Рисунок 4 – Сообщения о неисправности модуля МВ110-224.1ТД

Таким образом, следует заметить, что неисправности электрооборудования установки на современных пожарных автолестницах производства ЗСПТ и их аналогах могут носить системный характер, что позволяет с большой степенью точности определить суть и место неисправности. Данная статья носит исключительно обзорный характер, не является руководством по ремонту и лишь указывает возможные направления решения проблем. Нужно помнить, что ремонтом электрооборудования должны заниматься специализированные организации, иначе это может отрицательно повлиять на дальнейшую эксплуатацию техники.

Список литературы

1 Система стандартов пожарной безопасности. Автолестницы пожарные и их составные части. Общие технические требования. Методы испытаний : СТБ 2512-2017. – Введ. 31.07.2017. – Минск : Изд-во стандартов, 2017. – 47 с.

2 Автолестница пожарная АЛ-30 (5340С2) ЗСПТ 300Х И1. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию. – Орша : Завод соврем. пожар. техники, 2020. – 89 с.

3 Автолестница пожарная АЛ-32 (5340С3) ЗСПТ 300Х И2. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию. – Орша : Завод соврем. пожар. техники, 2020. – 113 с.

УДК 629.4.015.656.073.21

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ВАГОН ПРИ ПОГРУЗКЕ

Н. В. ИНОЗЕМЦЕВА, М. И. ЛИСКОВИЧ
Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

Динамические нагрузки на вагон при погрузке – это резкие, быстро меняющиеся во времени удары и усилия, которые возникают от падения кусков груза, работы тяжелой техники или сброса материалов на конструкцию кузова. Анализ динамических нагрузок – это основа безопасности, надежности и экономичности железнодорожного транспорта, сложная инженерная задача, требующая учета множества факторов: от типа груза и способа его подачи до конкретных механических характеристик самого вагона. Ключевым документом, регламентирующим нагрузки, является ГОСТ 22235-2010 [1]. Он устанавливает жесткие пределы, особенно для колесной техники внутри вагона.

При математическом моделировании основным методом оценки динамических нагрузок является метод коэффициента динамичности, который связывает статическую и динамическую реакции системы [2].

Коэффициент динамичности $К_д$ – это безразмерная величина, показывающая, во сколько раз динамическое напряжение или перемещение превышает статическое. Для ударной нагрузки его часто вычисляют по формуле, учитывающей высоту падения H и статическую деформацию системы $\delta_{ст}$:

$$К_д = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{ст}}}. \quad (1)$$

Динамическое напряжение $\sigma_д$ определяется через статическое напряжение $\sigma_{ст}$, которое возникло бы в конструкции от веса груза, приложенного статически:

$$\sigma_д = К_д \sigma_{ст}. \quad (2)$$

Сила удара $F_{уд}$: для сосредоточенного удара (например, падения крупной глыбы) рассчитывается через изменение импульса:

$$F_{уд} = \frac{mv}{\Delta t}, \quad (3)$$

где m – масса груза; v – скорость в момент удара, Δt – время ударного взаимодействия (для металлического пола порядка 0,0002 с, для сыпучих грузов – 0,002–0,006 с).

Основными факторами, оказывающими влияние на динамические нагрузки, является способ погрузки, тип груза, вид погрузочной машины. Рассмотрим эти факторы при наиболее часто встречающихся случаях погрузки.

1 Погрузка грейфером.

Наиболее опасна для кузова. Запрещено опускать грейфер с ударом о пол. Удар грейфера о пол или борта вызывает локальные пластические деформации и высокие напряжения. Напряженное состояние несущей конструкции полувагона при ударном взаимодействии с грейферным ковшом является критическим [2].

2 Погрузка сыпучих грузов (падение частиц) при падении сыпучего груза (щебень, руда) удар распределяется по площади. Активное давление сыпучего тела на стенки рассчитывается по теории Кулона [3]:

$$\sigma_x = \gamma h \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (4)$$

где γ – насыпная плотность; h – глубина; φ – угол внутреннего трения. Динамическая составляющая от вибрации и ударов при погрузке может значительно превышать статическую.

3 Погрузка металлолома и крупных глыб. Наиболее тяжелый режим. Удар сосредоточенной массы (глыба, кусок лома) вызывает сложную картину деформирования рамы. При падении глыбы в зону шкворневой балки возникают максимальные напряжения [4]. Это приводит к проседанию консоли рамы, повороту кузова относительно продольной оси и изгибу хребтовой балки. При ударе глыбы массой более 30 кН (3 тонны) в месте падения возникают пластические деформации пола.

Также на динамические нагрузки оказывает влияние тип груза. В таблице 1 приведены динамические коэффициенты для различных типов грузов при одинаковой высоте падения.

Таблица 1 – **Сводная таблица динамических коэффициентов**

Тип груза	Высота падения H, м	Время удара Δt, с	Динамический коэффициент $K_д$
Мелкий щебень (5–20 мм)	0–3	0,002	1–15
Средний щебень (20–40 мм)	0–3	0,003	1–10
Крупный щебень (40–80 мм)	0–3	0,004	1–8
Кусковая руда (до 0,4 м)	0–3	0,005	1–6
Крупный лом / глыба	0–3	0,006	1–5
Примечание – Значения $К_д$ рассчитаны для скорости удара $\upsilon = \sqrt{2gH}$ без учета начальной горизонтальной скорости.			

Тип погрузочной машины также оказывает влияние на динамические нагрузки. Рассмотрим основные типы этих машин.

1 Фронтальный погрузчик (ковш):

– начальная скорость: практически нулевая в момент разгрузки ковша;

– траектория: свободное падение с высоты разгрузки (обычно 2–3 м) почти вертикально вниз;

– удар: преимущественно вертикальный (о пол);

– сила удара: определяется высотой падения H.

2 Ленточный конвейер:

– начальная скорость: ненулевая, равна скорости ленты (1–3 м/с и выше);

– траектория: сложная парабола с горизонтальной составляющей;

– удар: комбинация вертикального и горизонтального ударов (о пол и стенки), угол зависит от скорости ленты;

– сила удара: скорость частиц выше, чем при простом падении, что создает дополнительную ударную нагрузку на стенки и углы вагона.

3 Грейферный кран:

– начальная скорость: близка к нулю при раскрытии грейфера;

– траектория: падение с высоты раскрытия;

– удар: запрещено опускать грейфер с ударом об пол. Удар грейфера о борта и обвязку кузова – критическая нагрузка.

Таким образом, проанализировав основные факторы, можно сделать следующий вывод: наибольшую опасность для вагона представляют удары сосредоточенных масс (крупные глыбы, металлолом) и удары грейфером. Эти нагрузки носят импульсный характер, вызывают локальные пластические деформации и высокие напряжения в раме кузова. Нагрузки от сыпучих грузов более распределены, но при больших высотах падения и наличии горизонтальной скорости (конвейер) также могут приводить к значительным динамическим напряжениям. Для минимизации рисков необходимо строго соблюдать нормативы ГОСТ и технологические регламенты.

Список литературы

1 ГОСТ 22235–2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. – Введ. 01.05.2011. – М. : Стандартинформ, 2011. – 22 с.

2 **Герасимов, К. В.** Нагруженность кузова полувагона глухого типа при падении глыбы груза : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.22.07 / Кирилл Вячеславович Герасимов ; БГТУ. – Брянск, 2017. – 25 с.

3 **Снитко, Н. К.** Статическое и динамическое давление грунтов и расчёт подпорных стенок. – Л. : Госстройиздат, 1963. – 296 с.

4 **Герасимов, К. В**. Нагруженность полувагона с настилом пола при погрузочно-разгрузочных работах / К. В. Герасимов, В. В. Кобищанов, Д. Ю. Расин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – № 4 (48). – С. 45–49.

УДК 004.8:656.2

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

С. Г. ИСТОМИН, К. И. ДОМАНОВ, А. П. ШАТОХИН, И. Н. ДЕНИСОВ
Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация

Обеспечение безопасности на железнодорожном транспорте является одной из приоритетных задач во всём мире. Согласно статистике более 40 % отказов технических средств приходится на инфраструктуру, а основной причиной аварий является несанкционированное проникновение людей, животных и транспортных средств на железнодорожные пути [1, 2].

В последние годы наблюдается активное внедрение методов машинного обучения и глубокого обучения для решения задач по распознаванию объектов на железнодорожном транспорте. Работа посвящена систематизации современных подходов с выделением их сильных сторон, ограничений и перспектив практического применения.

При исследовании вопросов распознавания положений стрелочных переводов стоит выделить работу [3], где предложен комплексный подход к анализу кривых тока стрелочных переводов на основе статистических методов и машинного обучения. Авторы [3] используют данные с систем мониторинга состояния, собранные с интервалом 10 мс в течение 60 дней. Основная идея заключается в классификации кривых мощности на нормальные и ненормальные с последующей квалификацией положений стрелочных переводов.

Результаты показали, что использованные алгоритмы машинного обучения: k-NN (k-ближайших соседей) обеспечивает точность 98,55 % при классификации полных кривых, чувствительность 99,29 % и специфичность 88,99 %. Алгоритм Shapelets показал точность 93,78 % при чувствительности 95,21 % и специфичности 92,29 %. Применение метода опорных векторов (SVM) оказалось нецелесообразным из-за высокой размерности данных (270 признаков), что приводило к чрезмер-

ным вычислительным затратам. Важным результатом является анализ сегментированных кривых: наибольшая информативность обнаружена для третьего участка кривой, где точность классификации достигает 98,03 %.

Другим важным вопросом является обнаружение объектов железнодорожной инфраструктуры. Здесь стоит обратить внимание на работу российского ученого В. А. Фёдорова [4]. Его исследование посвящено применению нейросетевой модели YOLOv8 с аппаратным ускорением на нейропроцессорах для детектирования объектов железнодорожной инфраструктуры. Протестированы пять конфигураций модели (YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l, YOLOv8x) с различными разрешениями входного изображения (от 480×480 до 1504×1504 пикселей). Обучение проводилось на наборе данных из более чем 20 000 изображений в формате Full HD (1920×1080 пикселей), размеченных с использованием ограничивающих рамок.

Анализ результатов выявил закономерный компромисс между точностью и скоростью обработки. Модель YOLOv8x с разрешением 1504×1504 достигла максимальной средней точности mAP = 0,92, что делает ее предпочтительной для задач, где критична точность обнаружения. В то же время модель YOLOv8n с разрешением 480×480 обеспечила максимальную скорость 34,38 кадров в секунду, что важно для систем реального времени.

Рассматривая мировые разработки в сфере обнаружения препятствий на железнодорожных путях, можно выделить исследование коллектива ученых из Бангладеш [5], в котором предложен метод обнаружения препятствий (людей, животных, транспортных средств) на железнодорожных путях с использованием модели MobileNetV2 на основе сверточных нейронных сетей. Собран и размечен собственный набор данных из 3192 изображений (по 1596 для каждого класса: «пустой путь» и «препятствие»), включающий съемку в реальных условиях с различных ракурсов.

Методология включает предварительную обработку (масштабирование, удаление шумов) и аугментацию данных (повороты на ±15°, сдвиги, масштабирование, изменение яркости, горизонтальное и вертикальное отражение). Для обучения применена стратегия трансферного обучения с использованием предварительно обученных весов на датасете ImageNet. Сравнение пяти моделей (YOLOv5, ResNet50, VGG16, VGG19, MobileNetV2) показало, что MobileNetV2 достигает наивысшей точности 97,00 % при наименьших требованиях к вычислительным ресурсам. Модель также продемонстрировала скорость, достаточную для работы на маломощных устройствах.

Дополнительно по тематике рассмотрена работа китайских исследователей [6], в которой описана модифицированная версия архитектуры Mask R-CNN для задач обнаружения и сегментации препятствий в системах автоматического управления поездами. Предложенная модель ME Mask R-CNN включает три ключевых усовершенствования: 1) сеть извлечения признаков SSwin-Le Transformer, в которой реализованы Spatial Shuffle и локально-усиленный блок прямого распространения (LeFF) с глубинной разделимой сверткой; 2) сеть слияния признаков ME-PAFPN с модулями RFA (Residual Feature Augmentation), ASPP (Atrous Spatial Pyramid Pooling) и BSF (Balanced Semantic Feature); 3) метод семплирования PISA (Prime Sample Attention).

Эксперименты проводились на наборе данных, собранном на линии метро Наньнина, включающем 11 классов объектов: человек, рельс, коробка, знак, рекламный щит, распределительный щит, рюкзак, картон, сигнал, платформа, каска. Данные охватывают три сценария: линия испытаний, ночные условия и туннельная линия. Результаты показали, что ME Mask R-CNN достигает средней точности mAP = 91,3 % (на 11,1 % выше базовой модели Mask R-CNN). Особенно значительное улучшение наблюдается для малых объектов: прирост точности составил 19,35 %. Скорость обработки составила 4,2 кадра в секунду.

Проведенный анализ научно-технической литературы позволяет выделить несколько ключевых тенденций. Во-первых, наблюдается переход от традиционных методов обработки сигналов и ручного проектирования признаков к сквозным архитектурам глубокого обучения. Во-вторых, архитектуры на основе трансформеров (Swin Transformer) демонстрируют преимущества перед чисто сверточными сетями при обнаружении малых объектов за счет моделирования дальних зависимостей. В-третьих, аппаратное ускорение становится критически важным для развертывания моделей в реальных условиях эксплуатации.

Общей проблемой для всех рассмотренных подходов остается работа в сложных условиях: плохое освещение, погодные условия, частичное перекрытие объектов. Перспективными направлениями являются мультимодальная сенсорная интеграция камер лидаров и радаров, применение мето-

дов дистилляции знаний для уменьшения размера моделей, а также разработка специализированных датасетов, охватывающих широкий спектр аномалий.

Современные методы машинного обучения и компьютерного зрения обеспечивают высокую точность обнаружения неисправностей и препятствий на железнодорожном транспорте (88–98 %), однако практическое внедрение требует решения проблем вычислительных мощностей и их эффективности, устойчивости к изменению внешних условий и обработки несбалансированных данных. Дальнейшее развитие связано с мультимодальными подходами, использованием трансформерных архитектур и оптимизацией для бортовых систем реального времени. Представленные результаты имеют прямое практическое применение для повышения безопасности и эффективности эксплуатации железнодорожной инфраструктуры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-20129, https://rscf.ru/project/25-19-20129/ и субсидии Омской области в рамках соглашения № 8 от 22.04.2026 о предоставлении из областного бюджета гранта в форме субсидии.

Список литературы

1 Автономное движение – отечественный и зарубежный опыт / А. И. Долгий, Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2022. – № 12. – С. 14–16. – DOI: 10.34649/AT.2022.12.12.002.

2 **Охотников, А. Л.** Информационная система технического зрения / А. Л. Охотников, В. Я. Цветков // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 1. – С. 23–26. – DOI: 10.62994/AT.2025.1.1.005.

3 Pattern recognition based on statistical methods combined with machine learning in railway switches / A. Muñoz del Río, I. Segovia Ramirez, M. Papaelias and F. P. García Márquez // Expert Systems with Applications. – Mar. 2024. – Vol. 238. – P. 122214. – DOI: 10.1016/j.eswa.2023.122214.

4 **Fedorov**, **V. A**. Railway Infrastructure Detection Based on YOLOv8 with NPU Acceleration / V. A. Fedorov // Doklady Mathematics. – Dec. 2024. –Vol. 110. – № S1. – P. S42–S48. – DOI: 10.1134/s1064562424601951.

5 Real-Time Obstacle Detection Over Railway Track using Deep Neural Networks / F. U. Rahman, Md. T. Ahmed, Md. M. Hasan, N. Jahan // Procedia Computer Science. – 2022. – Vol. 215. – P. 289–298. – DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.031.

6 **Hu, T**. Railway obstacle intrusion detection and risk assessment based on MSIA-YOLOv8 and DALNet / T. Hu, F. Gao, F. Zhou // Expert Systems with Applications. – Mar. 2026. – Vol. 299. – P. 130132. – DOI: 10.1016/j.eswa.2025.130132.

УДК 629.1:621.396.96

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ СВЧ-ТЕХНОЛОГИЙ В ДОРОЖНЫЕ ПОКРЫТИЯ

П. А. КАЦУБО, Н. С. ГАПЕЕВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Введение. Обеспечение безопасности на современных дорогах в зимний период требует поиска более эффективных и экологичных альтернатив традиционным методам борьбы с гололедом, таким как механическая очистка или применение химических реагентов. В работе рассматривается перспективное направление – технологии прямого подогрева дорожного покрытия. В докладе анализируются физические принципы работы систем на основе электромагнитного излучения и солнечных коллекторов, а также проводится критическая оценка их эксплуатационных характеристик и потенциала внедрения.

Физические основы подогрева материалов электромагнитным излучением

Нагрев материалов электромагнитным излучением основан на преобразовании энергии электромагнитного поля в тепловую. Механизм преобразования зависит от частоты излучения и свойств материала. В работе рассмотрим диэлектрический нагрев. Диэлектрический нагрев (СВЧ, ИК) вызывает колебания молекул или ионов в материале, что приводит к выделению тепла вследствие внутреннего трения.

Нагрев СВЧ-излучением

Нагрев с использованием сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения основан на диэлектрических потерях в материале. Вода и некоторые компоненты асфальтобетона хорошо поглощают микроволновую энергию. СВЧ-излучение проникает в покрытие, вызывая колебания молекул воды и полярных веществ, что приводит к объемному нагреву. Эта технология эффективна для удаления обледенения, так как в первую очередь нагревается влага. Однако требуется значительная энергия, а оборудование (магнетроны) может быть громоздким и дорогим.

Инфракрасный нагрев

Инфракрасный нагрев основан на передаче тепла излучением в ИК-диапазоне. Инфракрасные излучатели (газовые или электрические) направляют волны на поверхность дороги, где энергия поглощается верхним слоем покрытия и преобразуется в тепло. Это обеспечивает быстрый поверхностный нагрев, что полезно для локального ремонта (например, разогрева стыков или ям). Главный недостаток – малая глубина проникновения, что ограничивает применение для борьбы с наледью на всей толщине покрытия.

Солнечные коллекторы

Это устройство, известное как гелиоустановка, которое улавливает тепловую энергию солнца, включая видимый свет и ближнее инфракрасное излучение. В отличие от солнечных батарей, генерирующих электричество, солнечные коллекторы преобразуют солнечную энергию в тепло, нагревая теплоноситель.

Полученное тепло может использоваться для подогрева дорожного покрытия. Для этого в дорожное полотно встраивается система трубопроводов, по которым циркулирует нагретый теплоноситель, вода или антифриз.

Преимущества, недостатки

Ключевые преимущества электромагнитных излучений: интеграция инфракрасного и сверхвысокочастотного излучения в системе управления дорожным движением – позволяет значительно повысить безопасность на ответственных участках дорог, таких как автобусные остановки, перекрестки, пешеходные переходы, спуски и подъёмы, полосы разгона и торможения. Использование этих технологий минимизирует загрязнения дорожного покрытия, которые возникают из-за использования реагентов, что создает более комфортные условия для пешеходов и водителей, а также снижает затраты на содержание дорожной инфраструктуры. К плюсам также относится автономность и автоматизация всего процесса.

Основные недостатки электромагнитных излучений: капитальные затраты на оборудование и модернизацию дороги; технологические ограничения, зависимость от состава покрытия, глубины прогрева (для ИК) и наличия влаги (для СВЧ). Также существуют вопросы к безопасности излучения и влиянию на коммуникации.

Основные преимущества солнечного коллектора: подогрев дорожного покрытия помогает избежать образования ледяной корки и накопления снега, что повышает безопасность дорожного движения, системы подогрева могут снизить необходимость в использовании снегоуборочной техники и химических реагентов, использование солнечной энергии снижает зависимость от ископаемых источников энергии.

Основные недостатки солнечных коллекторов: установка солнечных коллекторов и системы подогрева может потребовать значительных инвестиций, эффективность системы зависит от солнечной активности, что может ограничивать ее использование в регионах с низким уровнем солнечного света, интеграция системы подогрева в существующую инфраструктуру может быть сложной задачей.

Экономические и экологические аспекты

Экономика проектов определяется балансом высоких первоначальных инвестиций и потенциальной экономии на эксплуатации: снижение затрат на реагенты, технику, ремонт покрытия и ликвидацию последствий коррозии.

Экологические преимущества значительны: исключается загрязнение почвы и водоемов химическими реагентами, снижается использование противогололедной техники, работающей на ископаемом топливе.

Заключение и перспективы развития

Использование электромагнитного излучения и солнечных коллекторов для подогрева дорожного полотна представляет собой инновационное и перспективное направление. Несмотря на существующие технико-экономические барьеры, технологии демонстрируют высокий потенциал для повышения безопасности дорожного движения и эффективности ремонтных работ. Перспективы развития связаны с созданием новых композитных материалов с улучшенными поглощающими свойствами, оптимизацией энергопотребления, интеграцией с системами возобновляемой энергетики (солнечные батареи) и развитием интеллектуальных систем управления, активирующих подогрев только при необходимости.

Список литературы

1 **Гуреев, А. А.** Новые технологии в дорожном строительстве: применение электромагнитного нагрева / А. А. Гуреев, И. В. Королев. – М. : Инфра-Инженерия, 2020. – 156 с.

2 **Liu, Q.** Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete / Q. Liu, M. F. C. van de Ven // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 197. – P. 780–791.

3 **Jansson, H.** Microwave heating in road construction and maintenance / H. Jansson // Journal of Transportation Engineering. – 2018. – Vol. 144(5). – P. 04018020.

4 Рекомендации по применению инфракрасных технологий для ремонта асфальтобетонных покрытий. – СПб. : ДОРНИИ, 2019. – 45 с.

5 European Commission. Report on alternative methods for snow and ice removal on roads. – Brussels, 2021. – 89 p.

УДК 656.07:004.9

ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУЗОПОТОКОВ В ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

В. Г. КОЗЛОВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Эффективность управления транспортным комплексом во многом определяется полнотой сведений о величине, направлениях и структуре грузопотоков, а также об их распределении по элементам транспортной сети. Для Республики Беларусь, значительная часть транспортной работы которой связана с обслуживанием международных перевозок, данная задача приобретает особую актуальность в связи с изменением географии внешнеторговых связей и развитием национальной логистической системы [1]. Вместе с тем государственная статистическая отчетность отражает грузопотоки в агрегированном виде – по видам транспорта, видам сообщения и областям – без привязки к конкретным элементам сети, что не позволяет непосредственно восстановить направления перемещения грузов и оценить нагрузку на отдельные участки и узлы.

Решение указанной проблемы обеспечивает геопространственный анализ распределения грузопотоков, предполагающий связывание каждой единицы учитываемого объема перевозок с конкретными элементами транспортной сети и их географическими координатами. Опыт исследований показывает, что практическая реализуемость такого анализа определяется не столько составом применяемого математического аппарата, сколько качеством и полнотой информационной основы, на которой он разворачивается.

Информационное обеспечение геопространственного анализа целесообразно рассматривать как четырехуровневую структуру, включающую первичные данные (государственная статистическая отчетность, системы учета перевозок, таможенная статистика, картографические и ведомственные ресурсы), нормативно-справочные данные (классификаторы, справочники объектов, таблицы соответствия кодов), производные данные (цифровая модель сети, матрицы корреспонденций) и аналитические данные (тематические слои и расчетные показатели). Ни один из источников в отдельности не обеспечивает одновременно полноты пространственного охвата, детальности атрибутивного описания и топологической корректности, поэтому информационно-аналитическая основа строится по принципу интеграции источников с установлением приоритета каждого из них для соответствующих групп характеристик. Институциональной предпосылкой такой интеграции является создание Национальной инфраструктуры пространственных данных. Критическим звеном при этом выступают нормативно-справочные данные: связывание сведений независимых систем, использующих несовпадающие коды объектов, обеспечивается введением неизменяемого внутреннего идентификатора объекта и ведением таблицы соответствия его кодам во внешних системах.

Пространственное представление транспортной сети основывается на иерархической классификации объектов на узловые (раздельные пункты, грузовые терминалы, логистические центры, пункты пропуска) и линейные (участки железных и автомобильных дорог). Наряду с прямой координатной привязкой применяется линейная привязка по километражу, устойчивая к уточнению геометрии сети и соответствующая принятой в отрасли системе описания местоположения объек-

тов. Сеть представляется на республиканском, региональном и локальном уровнях детализации с соблюдением правила иерархической вложенности, а данные организуются в пять групп тематических слоев: картографической основы, транспортной инфраструктуры, топологической модели, грузообразующих объектов и аналитических слоев.

Для расчетных процедур транспортная сеть представляется ориентированным взвешенным графом, вершины которого соответствуют узловым элементам, дуги – линейным элементам, а веса – их технико-эксплуатационным характеристикам. Разработанные правила выделения вершин и дуг сокращают размерность графа на порядок по сравнению с числом точек, описывающих геометрию сети, а система топологических ограничений, включающая ограничения геометрической корректности, взаимного расположения объектов в пределах слоя и между слоями, а также атрибутивной согласованности, обеспечивает контроль качества модели. Маршруты следования грузопотоков хранятся в виде последовательности идентификаторов дуг, а транзитные, экспортные и импортные потоки описываются с использованием внешних узлов, что обеспечивает единообразие расчетных процедур независимо от вида сообщения.

Результаты распределения грузопотоков формируются в виде аналитических показателей четырех групп, характеризующих линейные элементы (объем перевозок, грузооборот, коэффициент использования пропускной способности), узловые элементы (объем переработки, коэффициент использования перерабатывающей способности, доля транзитного потока), транспортные районы (объемы зарождения и погашения грузопотоков, структура межрайонных связей) и сеть в целом. Их картографическое представление предусматривает отображение интенсивности потока шириной условного знака с нелинейной шкалой, фиксируемой в нормативно-справочных данных, что обеспечивает сопоставимость результатов различных расчетных сценариев.

Существенное расширение возможностей анализа связано с созданием национальной системы электронной логистики и экосистемы цифровых транспортных коридоров Евразийского экономического союза [2]. Юридически значимые электронные перевозочные документы – электронная транспортная накладная, e-CMR, накладные СМГС и ЦИМ/СМГС – содержат сведения о пунктах отправления и назначения, роде и массе груза по каждой отправке и позволяют формировать матрицу грузовых корреспонденций непосредственно по данным фактически выполненных перевозок. Это определяет проектное требование к геопространственной модели: она разрабатывается на основе существующих источников данных при обязательном обеспечении возможности последующего подключения источников электронной логистики без перестроения модели.

Практическое применение результатов геопространственного анализа охватывает выявление участков и узлов с дефицитом пропускной и перерабатывающей способности, обоснование мероприятий по развитию транспортной инфраструктуры и размещению логистических центров, сравнительную оценку загрузки параллельных направлений различных видов транспорта и сценарное прогнозирование.

Таким образом, геопространственный анализ распределения грузопотоков представляет собой эффективный инструмент информационной поддержки управления транспортной системой. Формирование информационно-аналитической основы, разработка принципов пространственного представления объектов и топологической структуры модели транспортной сети создают методическую базу для перехода от агрегированной статистики к пространственно определенной оценке нагрузки на элементы сети, а интеграция с цифровыми платформами электронной логистики обеспечивает актуальность и достоверность исходных данных.

Список литературы

1 Об утверждении Концепции развития логистической системы Республики Беларусь на период до 2030 года : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 28 дек. 2017 г. № 1024 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21701024 (дата обращения: 19.09.2026).

2 **Козлов, В. Г.** Цифровая трансформация бизнес-процессов железнодорожного транспорта / В. Г. Козлов // Тихомировские чтения: наука и современная практика технологии перевозочного процесса : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2025. – С. 89–91.

УДК 656.2:629.3.083

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ИХ ВЛИЯНИЮ НА НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ

О. И. КОС, В. Ю. СМИРНОВ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Для обеспечения безопасного и бесперебойного движения подвижного состава по железным дорогам необходимо рассчитывать надежность СТС, таких как искусственные сооружения, и прогнозировать ее изменение [1].

Наиболее подходящим методом для расчета надежности СТС, например, искусственных сооружений на железных дорогах, с учетом их специфических особенностей является метод логических схем, так как учитывает их наиболее важные специфические особенности. Одной из реализаций метода логических схем является рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС.

Для применения рекуррентного метода к СТС, таким как искусственные сооружения на железных дорогах, построим математический метод взаимосвязи и взаимовлияния элементов СТС и их влияния на систему в целом [2]. Для реализации этого метода элементы СТС, которой является искусственное сооружение на железной дороге, необходимо классифицировать в соответствии с их влиянием на отказ работы всей системы в целом.

Для каждого i-го элемента СТС введем коэффициенты α_i, β_i, γ_i, где $i = 1, \ldots, N$, а N – количество элементов в СТС.

Коэффициент критичности α_i характеризует критичность i-го элемента, то есть степень влияния отказа элемента на отказ всего искусственного сооружения:

– $\alpha_i = 1$, если элемент критичный, то есть его отказ приводит к отказу всей системы в целом;

– $\alpha_i = 0$, если элемент некритичный, то есть его отказ не приводит к отказу всей системы в целом.

Коэффициент групповой конгломерации β_i характеризует конгломеративность i-го элемента, то есть свойство элемента в случае отказа его и определенного количества соседних элементов приводить к отказу всей системы в целом:

– $\beta_i = 1$, если элемент конгломеративный, то есть его отказ и одновременный отказ определенного количества соседних элементов приводит к отказу всей системы в целом, а его отказ и отказ меньшего количества соседних элементов не приводит к отказу всей системы в целом;

– $\beta_i = 0$, если элемент неконгломеративный, то есть не обладает свойством конгломеративности.

Коэффициент работоспособности γ_i характеризует степень вклада i-го элемента в работоспособность системы в целом. На этот коэффициент умножается вероятность безотказной работы элемента во всех формулах при расчете вероятности безотказной работы всей системы в целом:

– при $\gamma_i = 1$, вероятность безотказной работы элемента не изменяет своего значения при вычислении вероятности безотказной работы всей системы в целом, то есть элемент вносит вклад в вероятность безотказной работы системы в целом, равный его собственной вероятности безотказной работы;

– при $\gamma_i = 0$ вероятность безотказной работы элемента становится равной нулю при вычислении вероятности безотказной работы всей системы в целом;

– при $0 < \gamma_i < 1$ вероятность безотказной работы элемента уменьшает свое значение при вычислении вероятности безотказной работы всей системы в целом, то есть элемент вносит вклад в вероятность безотказной работы системы в целом меньший, чем его собственная вероятность безотказной работы.

С учетом свойств критичности и конгломеративности элементы системы можно классифицировать следующим образом.

1 **Критичный элемент** – это такой элемент, отказ которого приводит к отказу всей системы в целом. Коэффициенты для этой группы задаются следующим образом:

$$\begin{gathered} \alpha_i = 1, \\ \beta_i = 0, \\ \gamma_i = \begin{cases} 1, & \text{при } p^* < p_i \le 1, \\ 0, & \text{при } 0 \le p_i \le p^*, \end{cases} \end{gathered} \tag{1}$$

где $i = 1, \ldots, N$, N – количество элементов системы; α_i – коэффициент критичности i-го элемента; β_i – коэффициент групповой конгломерации i-го элемента; γ_i – коэффициент работоспособности i-го элемента, p^* – предельная вероятность безотказной работы элемента, при которой элемент считается неработоспособным, т. е. максимальная вероятность безотказной работы, описывающая состояние неработоспособности.

2 **Критичный конгломерирующий элемент** – это такой элемент, отказ которого влияет на показатели надежности всей системы в целом, но не приводит к ее отказу, однако, если отказывает группа рядом расположенных таких элементов, то это приводит к отказу всей системы в целом. Коэффициенты для этой группы задаются следующим образом:

$$\begin{gathered} \alpha_i = 1, \\ \beta_i = 1, \\ \gamma_i = \begin{cases} 1, & \text{при } n \le k,\ p^* < p_i \le 1, \\ 0, & \text{при } n > k,\ \ p^* < p_i \le 1, \\ 0{,}9, \text{ при } n \le k, & \text{при } 0 \le p_i \le p^*, \\ 0, \text{ при } n > k, & \text{при } 0 \le p_i \le p^* \end{cases} \end{gathered} \tag{2}$$

где k – максимальное количество отказавших соседних элементов, при котором не происходит отказа всей системы в целом; n – количество отказавших соседних элементов.

3 **Некритичный конгломерирующий элемент** – это такой элемент, отказ которого не влияет на показатели надежности всей системы в целом, но если отказывает группа рядом расположенных таких элементов, то это приводит к отказу всей системы в целом. Коэффициенты для этой группы задаются следующим образом:

$$\begin{gathered} \alpha_i = 0, \\ \beta_i = 1, \\ \gamma_i = \begin{cases} 1, & n \le k \\ 0, & n > k, \end{cases} \text{ при } P^* < P_i \le 1, \\ \begin{cases} 1, & n \le k \\ 0, & n > k, \end{cases} \text{ при } 0 \le P_i \le P^*. \end{gathered} \tag{3}$$

4 **Некритичный элемент** – это такой элемент, отказ которого не приводит к отказу всей системы в целом. Коэффициенты для этой группы задаются следующим образом:

$$\begin{gathered} \alpha_i = 0, \\ \beta_i = 0, \\ \gamma_i = \begin{cases} 1, & \text{при } P^* < P_i \le 1, \\ 1, & \text{при } 0 \le P_i \le P^*. \end{cases} \end{gathered} \tag{4}$$

Введение весовых коэффициентов дает возможность учесть свойство сверхаддитивности СТС, которое состоит в том, что в сложной системе в результате взаимосвязи между элементами результат функционирования всех элементов в системе не равен сумме результатов функционирования элементов в отдельности и которое присуще любому искусственному сооружению на железной дороге.

Математический метод расчета весовых коэффициентов является составной частью рекуррентного метода расчета надежности всей сложной технической системы на основе классификации элементов СТС с использованием коэффициентов критичности, групповой конгломерации и работоспособности для каждого элемента и с учетом всех произведенных замен (ремонтов) элементов этой системы в предшествующие моменты времени. На основе этого метода можно более точно моделировать влияние технического состояния элементов этого сооружения на техническое состояние всего сооружения в целом.

Результатом работы рекуррентного алгоритма расчета надежности всей сложной технической системы на основе классификации элементов СТС является значение вероятности безотказной работы в заданный момент времени или, что то же самое, при заданном значении прошедшей нагрузки. По этим значениям строится график вероятности безотказной работы всей сложной технической системы, такой как искусственное сооружение, в зависимости от времени или прошедшей нагрузки от начала эксплуатации сооружения на данном участке пути [3].

По заранее найденным функциям надежности и заданной классификации элементов с помощью рекуррентного метода рассчитывается зависимость вероятности безотказной работы СТС от времени и время, при котором будет достигнут критический уровень вероятности безотказной работы, т. е. срок эксплуатации СТС. Таким образом, созданная классификация элементов СТС позволяет моделировать влияние технического состояния этих элементов на техническое состояние всей СТС в целом.

Список литературы

1 **Smirnov, V. U.** Program module for calculating the optimal interval of preventive substitutions / V. U. Smirnov, O. I. Kos // Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS) : Proceedings 2017 IEEE International Conference. – 2017. – P. 282–283.

2 **Кос, О. И.** Рекуррентный алгоритм расчета и прогнозирования вероятности безотказной работы искусственных сооружений / О. И. Кос // Транспортное строительство. – 2014. – № 6. – С. 16–21.

3 **Кос, О. И.** Схема управления техническим состоянием искусственных сооружений / О. И. Кос // Мир транспорта. – 2016. – № 5. – С. 198–201.

УДК 656.2.07

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ В ЗАДАЧАХ ПЛАНИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ВАГОНО- И ПОЕЗДОПОТОКОВ

О. Н. ЛИСОГУРСКИЙ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Безопасность и устойчивость перевозочного процесса на железнодорожном транспорте определяются не только техническим состоянием пути, устройств электроснабжения и систем сигнализации. Существенное значение имеет способность сети принимать, пропускать, перерабатывать и передавать дальше заданные объемы вагонных и поездных потоков при изменяющихся условиях эксплуатации. Ошибки в планировании, несогласованность действий участников перевозок, превышение допустимой загрузки станций либо терминалов создают предпосылки для задержек, накопления вагонов, вынужденных остановок поездов и в конечном счете роста технологических рисков.

Для решения задач планирования и управления возникает необходимость сформировать систему параметров железнодорожной сети, позволяющую связывать характеристики инфраструктуры с условиями движения и обработки вагонопотоков. В качестве основной идеи принимается ситуационный подход: для каждого элемента фиксируются его устойчивые паспортные свойства, текущее состояние и действующие ограничения. Такое представление обеспечивает переход от статической характеристики сети к модели, применимой для расчетов размеров движения, выбора маршрутов, проверки выполнимости планов погрузки и выявления причин эксплуатационных затруднений.

Железнодорожную сеть целесообразно представить ориентированным мультиграфом

$$G = (V, E, F), \varepsilon = V \cup E \cup F , \quad (1)$$

где V – множество вершин, соответствующих раздельным пунктам (станциям, разъездам, обгонным пунктам, путевым постам); E – множество дуг, соответствующих перегонам, причем каждому главному пути перегона соответствует отдельная дуга; F – множество терминальных элементов, примыкающих к вершинам (грузовые фронты, пути необщего пользования, портовые и терминальные комплексы). Объединение ε образует полное множество элементов инфраструктуры, подлежащих параметрическому описанию. Вершины, соответствующие техническим и грузовым станциям, при необходимости раскрываются в подграфы второго уровня, элементами которых являются парки, отдельные пути, стрелочные горловины и сортировочные устройства.

Для формализации процессов взаимодействия участников перевозочного процесса проведена систематизация параметров инфраструктурного комплекса по четырем функциональным подсистемам: железнодорожные участки, станции, тягово-энергетическая система и СЦБ, терминальные комплексы.

Каждый элемент e_i предлагается описывать тройкой

$$e_i = P_i, S_i(t), \Omega_i(t), \quad (2)$$

где P_i – вектор паспортных (конструктивных) параметров, не изменяющихся в пределах горизонта оперативного планирования; $S_i(t)$ – вектор параметров состояния, значения которых зависят от времени и ситуации; $\Omega_i(t)$ – множество ограничений, действующих на элементе в момент *t*.

Совокупность *параметров состояния* разбивается на три группы, различающиеся природой и характером изменчивости:

1) нормативно-технологические параметры: допускаемые скорости, времена хода, станционные и межпоездные интервалы, нормы массы и длины поездов, технологические нормы времени на операции, суточный бюджет времени на содержание устройств, нормативные коэффициенты надежности и заполнения. Они устанавливаются нормативными и локальными актами владельца инфраструктуры и пересматриваются с периодичностью разработки ГДП, технологических процессов работы станций и т. д.;

2) эксплуатационно-ситуационные параметры: действующие предупреждения об ограничении скорости, отказы технических средств, предоставленные «окна», фактическая занятость путей, наличие локомотивов и бригад на элементе, режимные и конвенционные запреты, состояние грузовых фронтов, природно-климатические условия. Значения этих параметров изменяются в течение суток и формируют ситуацию *s*;

3) производные (расчетные) параметры*:* пропускная, провозная и перерабатывающая способность, вместимость, коэффициенты заполнения, доступности и напряженности. Они вычисляются по параметрам первых двух групп и являются непосредственным входом модели взаимодействия участников.

Система параметров должна быть необходимой и достаточной для принятия решений. Параметр включается в модель, если его изменение влияет на время операции, допустимую массу или длину состава, число пропускаемых поездов либо объем перерабатываемого вагонопотока; если он может быть измерен, рассчитан или получен из эксплуатационных систем; если для него определено нормативное либо расчетное значение.

Ограничения определяют, какие операции с поездом, вагоном или группой вагонов присутствуют на данном элементе. Если *x* – вектор характеристик операций с единицей транспортного потока (параметры поезда или группы вагонов, момент и продолжительность занятия элемента, маршрут следования), то множество допустимых операций на элементе e_i в момент *t* записывается в виде

$$\Omega_i(t) = x : g_{ik}(x,\ P_i,\ S_i(t)) \geq 0, k = 1,..., K_i, \qquad (3)$$

где g_{ik} – функции ограничений, каждая из которых соответствует одному условию (по длине, массе, габариту, скорости, интервалу, доступности во времени, роду груза и т. д.); K_i – число ограничений, действующих на элементе. Зависимость функций g_{ik} от $S_i(t)$ означает, что состав и границы множества $\Omega_i(t)$ изменяются вместе с ситуацией. Преимущество такой записи состоит в том, что ограничение становится проверяемым: для конкретного поезда можно установить не только факт невозможности операции, но и параметр, который является связывающим.

В рамках ситуационно-логистического подхода предложена трехмерная классификация ограничений инфраструктурного комплекса по природе их возникновения и временному характеру действия:

1) *статические* (конструктивно-технические) – задают предельно допустимые физические характеристики функционирования инфраструктурных элементов (длина путей, осевая нагрузка, профиль и габариты и т. д.);

2) *динамические* (эксплуатационно-ситуационные) – возникают в процессе текущего использования инфраструктуры и вызывают временное снижение ее фактической пропускной способности (технологические и ремонтные окна, временные ограничения скорости;

3) *логистико-организационные и сетевые ограничения* – обусловлены диспропорциями между подводимым вагонопотоком и перерабатывающей способностью терминальных элементов.

По характеру действия ограничения разделяются на жесткие и мягкие. Жесткое ограничение исключает операцию из множества допустимых и описывается индикаторной функцией; мягкое ограничение не исключает операцию, но связывает ее выполнение с дополнительными затратами

времени, ресурсов или риска и описывается штрафной функцией:

$$\chi_{ik}(\mathbf{x},t) = 1\left[g_{ik} \le 0\right], \varphi_{ik}(\mathbf{x},t) = c_{ik}\max\left\{0, g_{ik}(\mathbf{x}, P_i, S_i(t))\right\}, \quad (4)$$

где 1 [ ] – индикатор истинности условия; c_{ik} – коэффициент, переводящий величину нарушения в единицы времени или стоимости. К жестким относятся габаритные ограничения, ограничения по осевой нагрузке, по полезной длине пути (для поезда, превышающего длину пути без деления состава), запреты приема опасных грузов на неспециализированные пути, закрытие перегона на «окно». К мягким относятся снижение скорости, уменьшение числа доступных путей, ограничение производительности фронта, недостаток локомотивов: операция остается возможной, но ее продолжительность или стоимость возрастает. В модели планирования жесткие ограничения формируют множество допустимых вариантов, а мягкие учитываются при оценке продолжительности операций и выборе предпочтительного решения.

Для маршрута *R*, состоящего из последовательности элементов, доступность определяется пересечением ограничений по всем его звеньям:

$$\Omega_R(t) = \bigcap_{i \in R} \Omega_i(t). \quad (5)$$

Отсюда следует эффект переноса ограничений. Локальное затруднение на одном элементе становится ограничением для всей цепочки движения. Так, снижение перерабатывающей способности портового фронта уменьшает прием вагонов портовой станцией; это сокращает доступность подходов к ней, вызывает задержки поездов на предшествующих участках и может привести к ограничению погрузки у удаленных отправителей.

Ситуационное описание предполагает разграничение четырех состояний параметра: нормативного, наличного, планируемого и прогнозируемого. Нормативное значение соответствует расчетным условиям, установленным ГДП, технологическим процессом и паспортом объекта. Наличное отражает реальную обстановку: действующие предупреждения, отказы, фактическую занятость путей, наличие локомотивов, работу фронта, погодные и режимные факторы. Планируемое значение учитывает ремонты, развитие и утвержденные технологические мероприятия. Прогнозируемое – ожидаемое изменение состояния объекта вследствие деградации, накопления дефектов или вероятности отказов.

Для параметров производительности рационально использовать мультипликативный переход от нормативного к ситуационному значению:

$$p_i(s) = p_i^{\text{н}} \prod_{k=1}^{K} K_{ik}(s), 0 < K_{ik}(s) \le 1, \quad (6)$$

где $K_{ik}(s)$ – коэффициент влияния фактора ситуации *s*. Для временных характеристик более естественна аддитивная форма:

$$t_i(s) = t_i^{\text{н}} + \sum_{k=1}^{K} \Delta t_{ik}(s). \quad (7)$$

Например, предупреждение об ограничении скорости увеличивает время хода, «окно» сокращает время доступности, отказ сортировочного устройства повышает технологический интервал, а переполнение фронта увеличивает ожидание подачи. На этой основе может быть определен коэффициент напряженности элемента:

$$k_{\text{напр},i}(s) = \frac{N_{\text{потр},i}(s)}{\gamma_{\text{доп},i} N_i(s)}, \quad (8)$$

где $N_{\text{потр},i}(s)$ – потребная способность; $N_i(s)$ – наличная способность; $\gamma_{\text{доп},\,i}$ – допустимый коэффициент заполнения. При $k_{\text{напр},i}(s) > 1$ элемент является лимитирующим, а при значении, не превышающем единицу, располагает резервом.

Таким образом, параметрическое описание железнодорожной сети должно строиться как многоуровневая модель ресурсов и ограничений. Предложенный подход позволяет перейти от учета факта задержек к объяснению их причин. Он делает возможным выявление лимитирующего элемента маршрута, оценку влияния изменения технологии или технического состояния на размеры

движения, проверку реализуемости планов погрузки и адресное распределение мероприятий между владельцем инфраструктуры, перевозчиком, оператором подвижного состава и грузовладельцем. В контексте безопасности на транспорте это означает повышение управляемости перевозочного процесса: своевременное обнаружение дефицита ресурса и корректировка планов снижают вероятность развития локального затруднения в системное нарушение движения.

Список литературы

1 **Поспелов, Д. А.** Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. – М. : Наука, 1986. – 288 с.

2 **Левин, Д. Ю.** Теория оперативного управления перевозочным процессом : монография / Д. Ю. Левин. – М. : УМЦ ЖДТ, 2008. – 625 с.

3 **Пятков, Д. А.** Системный анализ подсистемы железнодорожной инфраструктуры как шаг к цифровому двойнику (стационарной системе) железнодорожного пути / Д. А. Пятков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 61–72.

УДК 316.77:004.8

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЫСОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ВОЗДУШНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ГОРОДА

А. И. ЛИСТОПАД, Р. А. ВИШНЕВСКИЙ
Белорусская государственная академия авиации, г. Минск

В Республике Беларусь (РБ), как и в большинстве стран мира, в последнее десятилетие наблюдается бурное развитие беспилотной авиации. Благодаря невысокой стоимости, маневренности и гибкости использования по сравнению с пилотируемые воздушными судами беспилотные летательные аппараты (БЛА) нашли свое применение во многих сферах деятельности. На международном авиационном рынке ежемесячно появляются множественные предложения по созданию единой системы, с помощью которой можно внедрить БЛА в воздушное пространство (ВП) городов, тем самым закрыть потребности в быстрой перевозке грузов и пассажиров в агломерациях.

Наиболее актуальным решением проблемы полетов БЛА над городами является концепция городской аэромобильности. К ее ключевым особенностям относятся: применение летательных аппаратов без двигателей внутреннего сгорания; использование небольших взлетных площадок, вместо крупных аэропортов; осуществление полетов на предельно малых (от 0 до 200 м) и малых (от 201 до 1000 м) высотах. Однако если создание посадочных площадок и мест для аварийных посадок в городской инфраструктуре не вызывает больших затруднений, то высотное разграничение требует детальной проработки.

Использование воздушного пространства (ИВП) в Беларуси осуществляется согласно Воздушному кодексу РБ и широкому перечню авиационных правил. По государственным приоритетам полеты БЛА занимают предпоследнюю 16-ю графу «Выполнение полетов других летательных аппаратов» [1] и требуют согласования с различными структурами: ВВС, ПВО, СБП, Генеральным штабом, Белаэронавигацией, ЦКОП и т. д. В Беларуси действует разрешительный порядок ИВП, поэтому перед началом полета пользователь дополнительно должен запросить условие и разрешение на вылет. Такой процесс значительно усложняет и замедляет создание единой полетной среды. Поэтому одним из оптимальных путей решения является высотное разграничение структуры городской аэромобильности, практически не затрагивающего зоны деятельности пилотируемой авиации, полеты которой начинаются преимущественно от 300 м и выше.

На начальном этапе необходимо структурировать приземный слой атмосферы: выделить используемые высоты, проанализировать основные потребности пользователей БЛА в городе. Для достижения данной цели следует разделить воздушное пространство на определенные уровни и выявить их ключевые особенности и назначение использования, как показано в таблице 1.

Таблица 1 – **Уровни воздушного пространства для полетов БЛА**

Уровень	Высота, м	Преимущества уровня	Недостатки уровня	Назначение полетов БЛА
Первый	0–50	Защита от ветра, использование визуальной навигации, быстрый доступ	Плотная застройка, сильные многолучевые отражения GPS, короткая линия видимости для сенсоров, высокий риск взаимодействия с людьми	Мелкие доставки, мониторинг дорожной обстановки, инспекции фасадов зданий, патрулирование
Второй	51–120	Менее плотная застройка, нет риска взаимодействия с людьми при штатном полете, практически нет затенения GPS-сигналов	Опасность столкновения с высотными объектами, нестабильная орнитологическая обстановка	Массовая городская доставка, аэрофотосъемка
Третий	121–300	Акустический комфорт для жителей городов, малое количество пользователей	Существенное влияние ветра и турбулентности на высотах выше зданий; требуется интеграция с диспетчерскими службами из-за вероятного пересечения с пилотируемой авиацией	Аэротакси, перевозка грузов и пассажиров, подходы к посадочным площадкам

Для реализации концепции городской аэромобильности на основании предложенных уровней можно определить особенности воздушного пространства над определенным городом. Так, на примере города Минска можно выделить следующие характерные черты:

1 Воздушное пространство первого уровня г. Минска характеризуется наличием жилой застройки, запретных зон, ограничения и опасных, запретных зон для полетов БЛА, ЛЭП, вышек и матч сотовой связи. Наиболее плотная застройка сконцентрирована в крупных спальных массивах на западе и юго-западе, а также в новых современных кварталах. Самые плотно застроенные микрорайоны: Каменная Горка, Сухарево, Домбровка и Кунцевщина [2]. Также особенностью первого уровня является наличие водоемов, которые изменяют микроклимат, влияющий на полет. Над водной поверхностью чаще образовываются туманы и низкая облачность как следствие высокой влажности, которая негативно сказываются на элементах БЛА. Поэтому предпочтительно избегать полетов непосредственно над водоемами для поддержания долгой работоспособности электрических элементов и аккумуляторов.

2 Для второго уровня значение имеет высотная застройка, трубы ТЭЦ, башенные краны, телевизионные вышки, ветрогенераторы. Скрытую опасность представляют турбулентные потоки, которые могут возникать из-за резкого изменения вертикального рельефа. Одной из ключевых особенностей данного уровня является сложная орнитологическая обстановка, снижающая безопасность полетов БЛА. В Минске обитает более 200 видов птиц, в черте города встречаются крупные виды чаек, которые массово вьют гнезда на плоских городских крышах и кормятся на полигонах ТБО «Тростенецкий» и «Северный».

3 На третьем уровне основная сложность осуществления полетов заключается в пересечении районов работы пилотируемой авиации. Несмотря на то, что полеты над городом без специального разрешения запрещены, в окрестностях города активно летают вертолеты и легкомоторные самолеты. В пригороде располагается аэродром совместного базирования «Липки», эксплуатируемый Минским аэроклубом ДОСААФ и ГААСУ «АВИАЦИЯ» МЧС РБ, а также государственный аэродром «Мачулищи». Данные пользователи имеют свои утвержденные стандартные элементы ВП, дополнительно для различных нужд могут использоваться и нестандартные элементы, которые предварительно согласовываются с ЦЕС ОрВД. Можно сделать вывод, что полеты БЛА на данных высотах должны осуществляется исключительно после утверждения соответствующей заявки. На востоке города находится Национальный аэропорт Минск, который не только обслуживает международные рейсы, но и принимает частные гражданские воздушные суда, полет которых может начинаться от малых высот.

Вышеприведенные особенности отражают лишь небольшую часть нюансов, с которыми можно столкнуться в период проектирования единой системы полетов на малых высотах. Интеграция БЛА в воздушное пространство современного города – это не просто технологический вызов, а задача создания принципиально новой, гибкой и безопасной трехмерной транспортной инфраструктуры. Более того, для реализации концепции городской аэромобильности необходимо анализировать не только особенности окружающей среды, но и изменение динамической воздушной обстановки в определенный момент времени.

Список литературы

1 Воздушный кодекс Республики Беларусь / Нац. центр правовой информации Респ. Беларусь. – URL: http://etalonline.by/ ?type=text&regnum=Hk0600117#load_text_none_2_1 (дата обращения: 17.07.2026).

2 Лучшие районы для жизни и инвестиций в Минске. – URL: https://5zvezd.by/luchshie-rajony-dlya-zhizni-i-investicij-v-minske/ (дата обращения: 17.07.2026).

УДК 347.823.1:338.47:656.73

ОБСЛУЖИВАНИЕ МАРШРУТНЫХ ПОЛЕТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА МАЛЫХ ВЫСОТАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФРАЗЕОЛОГИИ РАДИООБМЕНА НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

А. И. ЛИСТОПАД, Е. П. ШВАЙКО
Белорусская государственная академия авиации, г. Минск

В Республике Беларусь (РБ) в настоящее время существует три вида авиации: гражданская, государственная и экспериментальная. Согласно воздушному кодексу РБ государственная авиация включает и воздушные суда (ВС) ДОСААФ, которые используются для осуществления военной, пограничной, таможенной службы, правоохранительной деятельности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, решения задач в области мобилизационной подготовки, а также для решения иных государственных задач, связанных с применением авиации, определяемых Президентом Республики Беларусь [1].

Однако в большинстве случаев авиация ДОСААФ используется для осуществления учебных, спортивных и демонстрационных полетов, а также авиационных работ. Приведенные цели использования воздушного пространства (ВП) по своему приоритету находятся ниже регулярных полетов, перевозки грузов и почтовых отправлений и задач государственной важности. Следовательно, воздушные суда ДОСААФ обязаны предоставлять преимущество вышестоящим пользователям воздушного пространства.

Одной из ключевых особенностей полетов авиации ДОСААФ является использование нижнего воздушного пространства от предельно малых (0–200 м) до средних высот (1001–4000 м). Данные высоты часто могут быть задействованы малой гражданской авиацией, например, для осуществления полета частного легкомоторного самолета или вертолета. На высотах порядка 900–1200 м строятся заходы согласно схемам движения в международные аэропорты. В связи с транзитным расположением нашей страны на маршрутной карте полеты через нее выгодны для перелетов воздушных судов из европейских государств и стран СНГ. Если в последних в большинстве своем отмечается хорошее владение русским языком, то для иностранных пилотов такие полеты должны обслуживаться исключительно на английском языке.

Главной опасностью при использовании нижнего воздушного пространства является возможность пересечения траектории полетов на маршруте и районов аэродромов. Практически все полеты на малых высотах проходят с использованием правил визуальных полетов, в которых безопасный интервал составляет всего 150 м по вертикали. Так как разнообразие типов ВС, использующих нижнее ВП весьма широк, могут возникнуть заблуждения по скорости освобождения или занятия определенной высоты после получения соответствующей команды из-за разности в технических характеристиках.

Большая часть малой авиации Беларуси не оборудована транспондерами, по этой причине такие воздушные суда невозможно наблюдать на индикаторе воздушной обстановки. В таких случаях диспетчер определяет местоположение летательного аппарата по докладам экипажа, контролируя полет по прохождению контрольных точек, и предоставляет ему полетно-информационное обслуживание. У большинства государственных ВС отсутствуют системы предупреждения столкновения, поэтому авиадиспетчер является единственным связующим звеном в обеспечении безопасного эшелонирования между летательными аппаратами. Также при возникновении чрезвычайной ситуации только диспетчер способен дать сведения о примерном месторасположении аварийного судна для спасательных служб из-за отсутствия в их оборудовании аварийных радиобуев.

Полеты вне района аэродрома ДОСААФ и установленных элементов структуры ВП проходят под управлением местных диспетчерских пунктов и службы движения близлежащих аэропортов. Авиадиспетчеры на данном рабочем месте обязаны иметь рабочий уровень ИКАО не ниже четвертого. Однако данное требование не распространяется на всех пилотов ВС, находящихся под их управлением. Жесткого ограничения на данный момент не существует, так как государственная авиация Республики Беларусь использует фразеологию радиообмена только на русском языке. По данным статистики большое число аварий и инцидентов на местных диспетчерских пунктах из-за непонимания стандартной фразеологии чаще всего происходит из-за двусмысленности команд, языкового барьера или использования нетипичных выражений [2].

Для каждого вида авиации разработаны свои правила ведения радиообмена, которые регламентируются международными (для гражданской) и государственными (для государственной) нормативно-правовыми актами. В целях предупреждения возможного недопонимания между пилотами и диспетчером и ошибок интерпретации определенных понятий стоит предусмотреть возможность создания дополнений к правилам фразеологии радиообмена на английском языке с внесением особенностей полетов государственных воздушных судов. В таком документе должны быть отображены все термины и понятия, применяемые в государственной авиации с их кратким переводом и пояснительной частью на двух языках. Пример оформления перечня понятий, применяемых в государственной авиации, показан таблице 1.

Таблица 1 – **Перечень понятий, применяемых в государственной авиации**

Понятие	Значение понятия	Meaning of the concept	Пример перевода
Пилотажная зона	Выделенный участок ВП установленных размеров, предназначенный для отработки техники пилотирования, выполнения фигур сложного или высшего пилотажа, а также проверки полетных заданий	A designated airspace area of specified dimensions intended for practicing piloting techniques, performing complex or advanced aerobatic maneuvers, and verifying flight tasks	Aerobatic zone
Ведущий	Летчик или командир экипажа, который управляет полетом всей группы ВС или боевым порядком	A pilot or crew commander who controls the flight of an entire group of aircraft or a combat formation	Lead pilot
Ведомый	Летчик, который следует за ведущим и подстраивается под его курс	A pilot who follows the lead pilot and adjusts to their course	Wingman
Заход на роспуск	Авиационный маневр, при котором группа самолетов расходится из плотного строя для одиночного захода на посадку	An aviation maneuver in which a group of aircraft breaks from a tight formation to make individual landing approaches	Dissolution

Разработка такого перечня специфической фразеологии поможет снизить риски возникновения опасных сближений в воздухе и повысит уровень ситуационной осведомленности. В дальнейшем после разработки полного списка всех применяемых выражений их можно будет разделить на различные этапы полета и общую фразеологию. Такие данные можно также применять при подготовке будущих авиадиспетчеров, офицеров боевого управления, пилотов и военных летчиков с целью развития навыков универсального специалиста, который способен без трудностей работать как в гражданской, так и в государственной авиации.

Безопасность – это главный приоритет, который должен постоянно совершенствоваться и соответствовать современным стандартам. Небо является зоной повышенной опасности, и управление полетом невозможно без четкого радиообмена. Для создания комфортной среды при полетах следует серьезно заняться процессом разработки дополнений к авиационным правилам фразеологии радиообмена, способствующих повышению безопасности полетов.

Список литературы

1 Воздушный кодекс Республики Беларусь : 16 мая 2006 г. № 117-З : принят Палатой представителей 3 апреля 2006 г. : одобр. Советом Респ. Беларусь 24 апр. 2006 г. / Нац. центр правовой информации Респ. Беларусь. – URL: http://etalonline.by/?type=text&regnum=Hk0600117#load_text_none_2_1 (дата обращения: 14.07.2026).

2 Сбои в коммуникации «пилот-диспетчер»: причины, последствия и противодействие. – URL: https://naukaru.ru/ru/nauka/article/95/view (дата обращения: 16.07.2026).

УДК 656.08:001.895

ИННОВАЦИИ И ВЫЗОВЫ: ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ УГРОЗ

А. С. ЛЯХ, Я. А. ЗИЧЕНКО, В. К. КУЗНЕЦОВ, В. В. ПЕТРУСЕВИЧ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Транспортная система является одной из важнейших составляющих современной экономики и социальной жизни общества. От ее устойчивой и безопасной работы зависят развитие промышленности, функционирование городов, международная торговля, мобильность населения и защита стратегических интересов государства. В настоящее время транспортная отрасль активно внедряет цифровые технологии, автоматизированные системы управления, беспилотные транспортные средства и интеллектуальную инфраструктуру. Однако одновременно с преимуществами инновации создают новые риски и уязвимости. Поэтому обеспечение безопасности транспортных систем требует комплексного подхода, объединяющего технические, организационные, правовые и кадровые меры.

Современные транспортные системы включают автомобильный, железнодорожный, воздушный, морской и городской электрический транспорт. Каждый из этих видов имеет собственные особенности и угрозы, однако многие проблемы являются общими. К ним относятся дорожно-транспортные происшествия, технические неисправности, природные и техногенные чрезвычайные ситуации, террористические угрозы, преступные действия, ошибки персонала, а также кибератаки на информационные системы.

Одним из наиболее серьезных вызовов становится цифровизация транспорта. На транспортных объектах используются системы спутниковой навигации, автоматизированного контроля движения, электронного документооборота, дистанционного мониторинга и управления. В городах внедряются интеллектуальные транспортные системы, которые регулируют светофоры, анализируют загруженность дорог и помогают выбирать оптимальные маршруты. На железнодорожном и воздушном транспорте цифровые решения позволяют повысить точность управления движением и сократить влияние человеческого фактора.

Вместе с тем подключение большого количества устройств к информационным сетям повышает риск кибератак. Злоумышленники могут попытаться получить доступ к системам управления транспортом, нарушить работу диспетчерских центров, изменить данные навигации или вывести из строя сервисы продажи билетов и логистического планирования. Даже временный сбой цифровой инфраструктуры способен привести к задержкам, финансовым потерям и угрозе жизни людей. В связи с этим особое значение приобретают защита персональных данных, резервное копирование информации, многоуровневая аутентификация пользователей и постоянный мониторинг сетевой активности.

Важным направлением повышения безопасности является развитие беспилотных и автоматизированных транспортных средств. Беспилотные автомобили, поезда, летательные аппараты и складские транспортные роботы способны снизить количество аварий, связанных с усталостью, невнимательностью или неправильными действиями водителя. Автоматизация также позволяет более точно соблюдать скоростной режим, поддерживать безопасную дистанцию и своевременно реагировать на опасные ситуации.

Однако беспилотные технологии пока сталкиваются с рядом проблем. Автоматизированная система должна правильно распознавать дорожные знаки, пешеходов, препятствия и нестандартные ситуации. Сложности могут возникать при плохих погодных условиях, недостаточной видимости, повреждении дорожной инфраструктуры или непредсказуемом поведении участников движения. Кроме того, необходимо определить ответственность в случае аварии, разработать единые требования к сертификации оборудования и обеспечить защиту программного обеспечения от несанкционированного вмешательства.

Не менее важную роль играет техническое состояние транспортной инфраструктуры. Износ мостов, тоннелей, железнодорожных путей, аэродромов, портовых сооружений и автомобильных дорог может стать причиной крупных аварий. Для предотвращения подобных ситуаций необходимо регулярно проводить диагностику объектов и переходить от устранения последствий к прогнозиро-

ванию неисправностей. Современные датчики и системы дистанционного контроля позволяют отслеживать состояние конструкций, выявлять трещины, деформации, повышенную вибрацию и другие опасные изменения.

Перспективным решением является применение технологий предиктивного обслуживания. На основе данных от датчиков и результатов предыдущих проверок специальные программы могут заранее определить вероятность отказа оборудования. Это дает возможность своевременно заменить изношенные детали, организовать ремонт и не допустить остановки транспортного объекта. Использование беспилотных летательных аппаратов для обследования мостов, путей и линий электропередачи также повышает качество контроля и снижает риск для работников.

Особое значение имеет человеческий фактор. Даже при высоком уровне автоматизации в транспортной отрасли сохраняются профессии диспетчеров, машинистов, пилотов, водителей, инженеров и специалистов по техническому обслуживанию. Ошибки, недостаток опыта, нарушение инструкций или переутомление персонала могут привести к серьезным последствиям. Поэтому важными мерами являются качественная профессиональная подготовка, регулярная аттестация, тренировки в условиях чрезвычайных ситуаций и контроль режима труда и отдыха.

Следует уделять внимание и безопасности пассажиров. На вокзалах, в аэропортах, портах и метрополитене должны действовать системы видеонаблюдения, контроля доступа, оповещения и досмотра. При этом использование таких технологий должно осуществляться с учетом требований законодательства о защите персональных данных и частной жизни граждан. Безопасность не должна строиться только на усилении контроля: необходимо также обеспечивать доступность информации, понятную навигацию, возможность быстрой эвакуации и помощь маломобильным пассажирам.

В условиях чрезвычайных ситуаций транспортная система должна сохранять устойчивость и способность быстро восстанавливать работу. Для этого разрабатываются планы реагирования на аварии, пожары, наводнения, землетрясения, отключение электроэнергии и сбои информационных систем. Важную роль играют резервные центры управления, альтернативные маршруты, автономные источники питания и отлаженное взаимодействие между транспортными организациями, экстренными службами и органами государственной власти.

Таким образом, инновации открывают широкие возможности для повышения безопасности транспортных систем, но одновременно создают новые угрозы. Цифровые технологии, искусственный интеллект, беспилотные средства и интеллектуальная инфраструктура должны внедряться постепенно, с обязательной оценкой рисков и испытанием в реальных условиях. Нельзя ограничиваться только закупкой современного оборудования. Необходимы единые стандарты безопасности, надежная защита информационных систем, постоянный технический контроль и подготовка квалифицированных специалистов.

Главный принцип развития транспортной безопасности заключается в сочетании инноваций, ответственности и профилактики. Только комплексный подход позволит сделать транспорт более надежным, устойчивым и удобным для общества. В будущем безопасность транспортных систем будет зависеть не только от технических возможностей, но и от способности государства, бизнеса и граждан совместно противостоять современным угрозам.

УДК 656.2:004.8

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ПЕРЕСТРОЕНИИ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Т. А. МАЛАХОВА
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация

График движения поездов (ГДП) – базовый инструмент управления перевозочным процессом. В нормальном режиме он задает моменты отправления и прибытия, пропуск поездов по участкам, оборот составов и использование пропускной способности инфраструктуры. Однако реальная эксплуатация всегда сопровождается отклонениями: отказами инфраструктуры, занятием перегонов, превышением времени технологических операций, поздним оборотом составов, погодными факторами, ограничениями скорости и неравномерностью пассажирского спроса. В этих условиях возни-

кает задача перестроения графика – перехода от исходного плана к новому, допустимому и по возможности наименее ухудшающему качественные показатели решению.

В нашей стране применяются решения по анализу ГДП, сценарной оценке пропуска поездопотоков, использованию макромоделей и цифровых двойников, предиктивной диагностике верхнего строения пути и автопилоту пригородного/городского подвижного состава, разработанные в РЖД, НИИАСе и ВНИИЖТе [1, 2]. Эти разработки позволяют говорить о переходе от автоматизации отдельных функций к интегрированному интеллектуальному контуру управления перевозками. В железнодорожной отрасли искусственный интеллект для ГДП – это не «замена» классической теории расписаний, а надстройка над ней. Базовое ядро задачи по-прежнему формируется как задача оптимизации или диспетчерского выбора с жесткими ограничениями безопасности, а искусственный интеллект усиливает это ядро за счет прогнозирования, оценки вероятностей развития событий, ранжирования сценариев и автоматической генерации различных вариантов перестроения.

Цель перестроения ГДП можно сформулировать так: перевод системы из нарушенного состояния в новое допустимое состояние с минимальными потерями для пропускной способности, регулярности движения и качества обслуживания пассажиров. В теории и на практике цель перестроения всегда многоуровневая [3].

На первом (безусловном) уровне задача состоит в восстановлении допустимости: ни одно решение не может нарушать требования безопасности, интервального регулирования, занятости маршрутов, минимальных времен хода и стоянок, времени оборота локомотивов и вагонов, а также технических и технологических ограничений станций и участков. Если эти допустимости не обеспечены, решение вообще не может рассматриваться.

На втором уровне находится минимизация ущерба от нарушения. Этот ущерб можно измерять разными критериями:

– суммарной задержкой поездов;

– взвешенной задержкой с учетом приоритетов поездов;

– неудобством для пассажиров, включая ожидание, время в пути и потерянные пересадки;

– числом отмен, укороченных маршрутов и оборотов «не по плану»;

– отклонением от исходного графика, если важно сохранить устойчивость для смежных ресурсов;

– в отдельных случаях – энергопотреблением или числом конфликтных диспетчерских вмешательств.

Поэтому корректнее говорить не об одном универсальном критерии, а о группе критериев оптимизации. Для грузовых перевозок диспетчер чаще фокусируется на пропускной способности, минимизации суммарной и взвешенной задержки и сохранении устойчивости сети. В случае пассажирских перевозок большее значение имеют отмены, потерянные пересадки и нарушение времени прибытия пассажира в конечный пункт.

В задачах перестроения графика искусственный интеллект обычно выполняет три разные функции.

Во-первых, прогнозную. Модели машинного обучения оценивают вероятность опоздания, время освобождения ресурса, прогнозную продолжительность восстановления после сбоя, риск вторичных конфликтов и ожидаемый эффект для пассажира. Такие оценки становятся входными параметрами для оптимизационной модели.

Во-вторых, поисковую и ранжирующую. Искусственный интеллект может быстро генерировать и ранжировать варианты диспетчерских действий: кого пропускать первым, где целесообразно убрать или перенести пересадку, когда выгоднее ввести укороченный оборот, какой маршрут стоит считать приоритетным. Особенно полезны здесь гибридные подходы, в которых ML-модели работают как эвристика или оценочная функция над классическим MILP/CP/heuristic-ядром [4].

В-третьих, инфраструктурно-предупреждающую. Предиктивная диагностика пути, стрелок, вагонов и поездов уменьшает саму частоту ситуаций, требующих перестроения ГДП. Формально это не модифицирует модель расписания напрямую, но практически существенно влияет на устойчивость исполнения графика и качество сервиса.

Именно поэтому наиболее реалистичная архитектура для ГДП сегодня выглядит как трехслойная система: данные и цифровой двойник → ИИ-прогноз и сценарная оценка → математическая оптимизация и проверка безопасности.

Искусственный интеллект в современных железнодорожных системах наиболее эффективен как компонент гибридного контура: он улучшает прогноз, ускоряет поиск разумных сценариев и повышает устойчивость исполнения графика, но окончательное решение должно оставаться в пространстве допустимых, проверяемых и технологически реализуемых вариантов.

Список литературы

1 **Каспаров, И. В.** Направления применения искусственного интеллекта в области железнодорожного транспорта / И. В. Каспаров, А. А. Попель // Актуальные проблемы современного транспорта. – 2021. – № 4 (7). – С. 35–42. – EDN PENWLA.

2 **Охотников, А. Л.** Искусственный интеллект для железной дороги / А. Л. Охотников, А. В. Зажигалкин // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 5. – С. 30–34. – DOI: 10.34649/AT.2021.5.5.004. – EDN IFAYJK.

3 **König, E.** A review on railway delay management / E. König // Public Transport. – 2020. – Vol. 12, № 2. – P. 335–361. – DOI: 10.1007/s12469-020-00233-1.

4 Мультиагентный ИИ в диспетчерском управлении движением поездов // Железные дороги мира. – 2025. – № 5. – С. 49–52. – EDN ASDJEO.

УДК 656.259.2:656.254.1

СПОСОБ ИНФОРМИРОВАНИЯ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД О ПОКАЗАНИЯХ МАНЕВРОВЫХ СВЕТОФОРОВ НА ОСНОВЕ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

В. А. МИНАКОВ

Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация

Актуальной проблемой обеспечения безопасности маневровой работы на железнодорожных станциях является риск проезда запрещающих сигналов на некодируемых участках пути. Отсутствие каналов связи на данных отрезках пути исключает передачу данных о показаниях маневровых светофоров на бортовые средства безопасности локомотивов, из-за чего невозможно своевременно информировать локомотивную бригаду.

Проезды запрещающих сигналов классифицируются как грубое нарушения безопасности движения, способные привести к самым негативным последствиям. Причинами их возникновения служат как комплекс технических ошибок, так и человеческий фактор [1].

Анализ существующих способов идентификации светофоров на некодируемых участках пути позволяет выделить применение маневровой автоматической локомотивной сигнализации (МАЛС) и системы технического (компьютерного) зрения. Однако обе технологии обладают некоторыми недостатками, ограничивающими их повсеместное внедрение. Система МАЛС, использующая цифровой радиоканал, требует масштабных инфраструктурных затрат, развертывания стационарных радиосетей и привязана к цифровым моделям станций, что усложняет ее масштабирование [2]. Системы технического зрения функционируют автономно, но критически зависят от метеоусловий и освещенности, а также от условий видимости в кривых участках пути [3].

Таким образом, можно утверждать, что существует необходимость разработки новых экономически эффективных способов передачи информации о показаниях маневровых светофоров непосредственно на локомотив, способных гарантировать непрерывный контроль безопасности на некодируемых участках.

Способом решения данной задачи является решение, основанное на передаче показаний маневровых светофоров на некодируемых путях станции с помощью технологии *Bluetooth Low Energy* (*BLE*). Данный способ предполагает идентификацию показаний маневровых светофоров, локомотивными приборами безопасности при следовании по некодируемым участкам станции, посредством передачи информации о сигнале по каналу связи *BLE*. Способ включает размещение передающего оборудования (*BLE*-передатчик) у маневрового светофора и приемного оборудования на локомотиве (*BLE*-приемник) (рисунок 1).

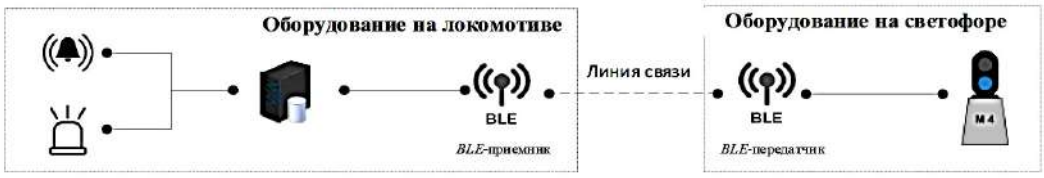


Рисунок 1 – Способ передачи информации маневровых светофоров

Применение технологии *BLE* для передачи обладает рядом достоинств, среди которых: радиус действия до 50 м, время отклика не более 50 мс, диапазон рабочих температур от –40 до +50 °С, а также низкая стоимость оборудования и простота компоновки [3].

Разработан тестовый образец на базе микропроцессорной платы *ESP*32 со встроенным радиомодулем *BLE* 5.0, мощностью 20 дБм (100 мВт), скоростью передачи сигнала – 1 Мбит/с и каналом радиосвязи в диапазоне 2,4 ГГц. Результаты теста показали всестороннее равномерное распространение сигнала *BLE*. На практике это может спровоцировать идентификацию локомотивом «ложного» сигнала светофора, не соответствующего железнодорожному пути, по которому следует. Решением служит формирование направленной зоны излучения сигнала, за счет отражающих поверхностей, то есть экранирования системы. Таким образом, мощность сигнала направленной зоны будет отличаться от той, на пути которой будут установлены экраны (отражающие сигнал поверхности).

Для подтверждения теоретических положений предложенного способа передачи сигналов, разработан экспериментальный образец *BLE*-устройств с экранированием *BLE*-передатчика. Целью выполнения эксперимента является подтверждение возможности формирования зоны сигнала по направлению к локомотиву. Результаты разработки экспериментального образа, представлены на рисунке 2.

а) *б*)

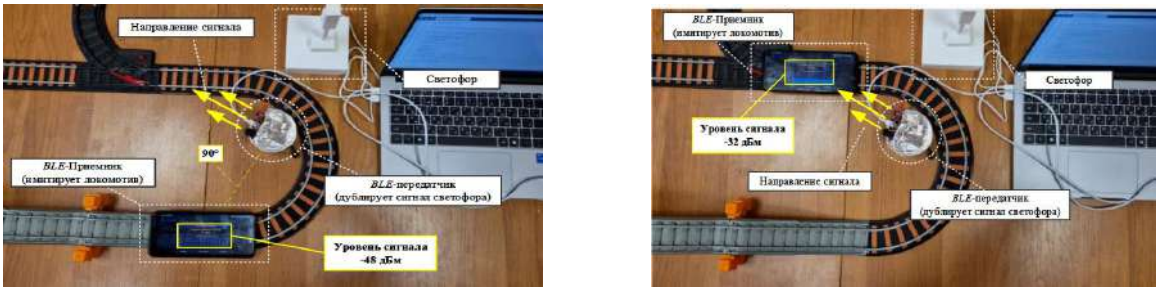


Рисунок 2 – Формирование направленной зоны сигнала
относительно (*а*) и в направлении (*б*) *BLE*-приемника (локомотива)

Результаты работы экспериментального образа показали, что при нахождении приемника на соседнем пути (под углом 90°) уровень сигнала составил –48 дБм. Данный результат подтверждает высокий риск ложного детектирования сигнала локомотивами со смежных путей, тогда как при формировании направленной зоны строго в сторону целевого локомотива уровень принимаемой мощности возрастает до –32 дБм. Это подтверждает эффективность применения экранирующих элементов, позволяя частично изолировать смежные направления и концентрируя мощность сигнала в целевом направлении. Дополнительно были выполнены измерения мощности сигнала по под различными углами *BLE*-передатчика. Получены средние значения мощности –37,2 дБм, тогда, как смещение *BLE*-приемника от главной оси приводит к резкому падению мощности от ~21 до ~45 %.

По результатам проведенного исследования установлено, что, определяя необходимую мощность *BLE*-приемника, расположенного на локомотиве, можно исключать сторонние сигналы и не принимать «ложные» сигналы. Таким образом, предложенный способ передачи сигнала позволит выполнять идентификацию показаний сигналов светофоров на некодируемых участках станций при выполнении маневровых работ.

Список литературы

1 **Минаков, В. А.** Технология машинного зрения на локомотивах для идентификации путевых сигналов / В. А. Минаков, В. К. Фоменко // Мир транспорта. – 2019. – № 17 (6). – С. 62–72. – DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-62-72. – EDN PKTLNS.

2 Система МАЛС как составляющая цифровой железной дороги / М. Ю. Акинин, С. И. Долганюк, Н. В. Романов, А. С. Чигирёнков // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 4. – С. 26–28.

3 **Минаков, В. А.** Разработка специализированного программного обеспечения для классификации объектов железнодорожной инфраструктуры в режиме реального времени / В. А. Минаков, В. С. Астапенко // Вестник транспорта Поволжья. – 2026. – № 2 (116). – С. 145–150. – EDN QXYTDB.

4 **Patti, G.** Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review / G. Patti, L. Leonardi, L. Lo. Bello // Sensors. –2018. – Vol. 18., is. 9. – Article 2802. – DOI: 10.3390/s 18092802.

УДК 625.06

ВЛИЯНИЕ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ НА КОЭФФИЦИЕНТ СЦЕПЛЕНИЯ

М. С. МОРДАС, Н. М. АКУЛИЧ
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Обеспечение безопасности дорожного движения выступает приоритетной задачей на этапах проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог. Ключевым фактором обеспечения безопасности движения транспортных средств является коэффициент сцепления шин с дорожным покрытием, определяющий длину тормозного пути. Коэффициент сцепления – это отношение реактивной силы, действующей на колесо автомобиля в плоскости его контакта с покрытием, к величине вертикальной нагрузки, передаваемой колесом на покрытие в плоскости этого контакта. Значительная часть ДТП, совершающихся на дороге, происходит из-за неудовлетворительного состояния поверхности покрытия, вызванного погодными условиями. Происшествия, возникшие из-за скользкости в неблагоприятные периоды, можно объяснить наличием на покрытии воды, грязи, снега и т. д., тогда как происшествия на сухих покрытиях связаны исключительно со скользкостью самого покрытия.

Анализ ДТП по видам при различном состоянии поверхности покрытия показал, что наиболее типичным являются столкновение встречных транспортных средств, опрокидывание на дороге, съезд с дороги и опрокидывание, столкновения на пересечениях в одном уровне. Необходимо отметить, что отличительной особенностью этих видов происшествий является то, что они более, чем другие виды, связаны со скользкостью. В среднем примерно 35,3 % происшествий произошло на скользких покрытиях, из них 24,9 % – на мокрых, загрязненных, покрытых снегом и гололедом. Остальные 10,4 % были вызваны скользкостью сухого покрытия в жаркие периоды года. Анализ ДТП по местам их возникновения позволил выявить наиболее опасные сочетания элементов плана и профиля дороги при различном состоянии покрытия. Значительное количество происшествий возникает на кривых в плане, пересечениях в одном уровне, зонах остановок общественного транспорта, подъемах и спусках. Для этих участков характерно большое количество происшествий из-за скользкости покрытия при сухом состоянии.

Значительная часть аварий совершается на сухих покрытиях. Но понятие «сухое» в жаркое время года для покрытий из материалов, обработанных органическими вяжущими, относительно, т. к. в летние месяцы из-за высокой температуры материал покрытия размягчается, битум из верхнего слоя покрытия под воздействием колес автомобилей выдавливается на поверхность, резко снижая величину коэффициента сцепления, а тем самым и безопасность движения. На грязных, мокрых, покрытых снегом и гололедом покрытиях абсолютное количество происшествий меньше, чем на сухих. Но если происшествия на сухих покрытиях и в неблагоприятные периоды года сравнить с продолжительностью этих периодов, то окажется, что относительное количество происшествий в неблагоприятные периоды года будет большим, чем в сухой период. Аналогично и в сухой период года при высоких температурах, когда верхний слой покрытия размягчается, относительное количество происшествий выше, чем в сухой период при более низких температурах. Необходимо отметить также, что в течение года покрытия в основном сухие, а атмосферные явления и очень высокие температуры, ухудшающие сцепные качества покрытий, наблюдаются в короткие промежутки времени.

Рост интенсивности движения и осевых нагрузок обуславливает ускоренное снижение транспортно-эксплуатационных характеристик асфальтобетонных покрытий. Соответственно, необходимо внедрение инновационных материаловедческих решений на базе передового опыта [1, 2].

Анализ эксплуатации традиционных дорожных битумов выявляет их высокую чувствительность к температурным изменениям. Значение пенетрации битума оказывает определяющее влияние на формирование структуры и долговечность дорожного покрытия [3]. Исследования в регионах с резкоконтинентальным климатом, какой и имеет Республика Беларусь, фиксируют размягчение битумов при высоких положительных температурах. Данный процесс вызывает выпотевание вяжущего на поверхность и сглаживание макрошероховатости, что влечет критическое снижение коэффициента сцепления во влажных условиях. В зимний период повышенная жесткость немодифицированного вяжущего провоцирует усталостное трещинообразование.

Решение указанной проблемы достигается путем применения полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) [4]. Исследование свойств ПБВ показывает, что введение эластомерных полимеров способствует формированию пространственной полимерной сетки в структуре битумной матрицы, обуславливая значительное расширение температурного интервала пластичности вяжущего. Комплексное использование модификаторов и пластификаторов обеспечивает направленное регулирование температурных характеристик битума и повышение его устойчивости к низкотемпературному трещинообразованию и высокотемпературным сдвиговым деформациям [5].

Применение полимерасфальтобетона в верхних слоях дорожных одежд обеспечивает стабильное удержание крупного минерального заполнителя. Повышенная когезионная прочность ПБВ предотвращает выкрашивание и вдавливание каменного материала под воздействием нагрузок от тяжеловесного транспорта. Данный фактор обуславливает сохранение проектных параметров микро- и макрошероховатости в течение всего срока эксплуатации и повышение сопротивляемости покрытия эффекту полируемости.

Наличие стабильной шероховатой текстуры способствует поддержанию высокого коэффициента сцепления в зоне контакта протектора шины с покрытием, оптимизируя водоотвод и минимизируя риск аквапланирования. Результаты практических испытаний подтверждают снижение тормозного пути автомобиля на покрытиях из полимерасфальтобетона на 10–15 % в сравнении с традиционными составами при эксплуатации в неблагоприятных погодных условиях.

В целях повышения экономической и экологической эффективности процесса модификации битумов целесообразно использование отходов промышленного производства. Данный подход обеспечивает получение вяжущих с улучшенными адгезионными показателями на фоне снижения общей себестоимости дорожно-строительных работ [6].

Таким образом, применение полимерно-битумных вяжущих представляет собой технологически обоснованный метод повышения уровня безопасности на автомобильном транспорте. Формирование сдвигоустойчивого полимерасфальтобетонного покрытия препятствует потере шероховатости, обеспечивает поддержание требуемого коэффициента сцепления шин с дорогой и создает условия для существенного снижения длины тормозного пути.

Список литературы

1 Use of Stone Mastic Asphalt (SMA) in Europe: Safety and Skid Resistance // European Asphalt Pavement Association (EAPA). – URL: https://eapa.org (date of access: 10.09.2026).

2 Полимерные решения в дорожном строительстве: устойчивость вместо латания // Международное информационное агентство «Казинформ». – URL: https://www.inform.kz (дата обращения: 10.09.2026).

3 **Акулич, Н. М.** Влияние пенетрации битума на покрытие автомобильной дороги / Н. М. Акулич, Е. О. Клименков ; науч. рук. М. С. Мордас // Транспортные сооружения : материалы 82-й Студ. науч.-техн. конф., апрель-май 2026 / редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.] ; сост. В. А. Ходяков. – Минск : БНТУ, 2026. – С. 201–203.

4 **Акулич, Н. М.** Использование полимерасфальтобетона для дорожных покрытий / Н. М. Акулич, Е. О. Клименков ; науч. рук. М. С. Мордас // Транспортные сооружения : материалы 81-й Студ. науч.-техн. конф., апрель-май 2025 / редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.] ; сост. В. А. Ходяков. – Минск : БНТУ, 2025. – С. 281–282.

5 **Акулич, Н. М.** Влияние модификаторов битума пластификаторами на его температурные характеристики / Н. М. Акулич, Е. О. Клименков ; науч. рук. М. С. Мордас // Транспортные сооружения : материалы 82-й Студ. науч.-техн. конф., апрель-май 2026 / редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.] ; сост. В. А. Ходяков. – Минск : БНТУ, 2026. – С. 205–207.

6 **Мордас, М. С.** Модификация битумов с использованием отходов промышленного производства / М. С. Мордас, Н. М. Акулич, Е. О. Клименков // Проблемы безопасности на транспорте : тезисы докладов XIV Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2025. – С. 228–230.

УДК 629.3.014.2

СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

А. А. МОРОЗОВ
Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, г. Минск

Электротранспорт является одним из наиболее динамично развивающихся секторов современной транспортной отрасли. Рост парка электрических транспортных средств (ЭТС) – электромобилей, электроавтобусов, электрических железнодорожных составов и трамваев – обусловлен стрем-

лением к снижению выбросов углекислого газа и повышению энергоэффективности транспортных систем. Вместе с тем широкое распространение ЭТС ставит перед инженерным сообществом принципиально новые задачи в области обеспечения безопасности, обусловленные специфическими физическими и техническими характеристиками высоковольтных тяговых систем.

Системы безопасности электротранспорта охватывают несколько взаимосвязанных направлений: защиту от поражения электрическим током, предотвращение тепловых аварий аккумуляторных батарей, управление процессами заряда и разряда накопителей энергии, а также интеграцию активных систем помощи водителю. Высоковольтные тяговые батареи на основе литий-ионных ячеек функционируют при напряжениях от 400 до 800 В, что требует надежной изоляции токоведущих частей, непрерывного мониторинга сопротивления изоляции и автоматического отключения при выявлении неисправностей [1].

Ключевым элементом безопасности ЭТС является система управления батареей (Battery Management System, BMS). Современные BMS реализуют функции многоуровневого контроля: мониторинг напряжения каждой ячейки, температурный контроль посредством термисторов и тепловизионных датчиков, балансировку заряда между ячейками, а также прогнозирование состояния здоровья батареи (State of Health, SOH). Применение алгоритмов машинного обучения позволяет прогнозировать аномальные режимы работы и предупреждать тепловой разгон ячеек – явление, представляющее наибольшую угрозу для пожарной безопасности ЭТС [2].

Тепловой разгон (thermal runaway) представляет собой самоподдерживающийся экзотермический процесс, при котором внутренние реакции в ячейке приводят к неконтролируемому росту температуры. Для его предотвращения применяются многоуровневые системы тепловой защиты: жидкостное охлаждение аккумуляторного отсека, фазовые накопители тепловой энергии, а также термические барьеры между ячейками. Наряду с аппаратными решениями разрабатываются программные методы ранней диагностики на основе анализа электрохимических импедансных характеристик ячеек.

Одной из актуальных тенденций является внедрение интегрированных систем активной безопасности, объединяющих функциональность BMS с системами автоматического экстренного торможения (Autonomous Emergency Braking, AEB), адаптивного круиз-контроля и мониторинга слепых зон. В электрических транспортных средствах, оснащенных рекуперативным торможением, принципиально важна корректная координация тормозных усилий между электродвигателями и традиционными фрикционными тормозами, что реализуется через интегрированные контроллеры тормозной системы [3].

Стандартизация в области безопасности ЭТС развивается параллельно с техническим прогрессом. Международные стандарты ISO 6469 (безопасность электромобилей), IEC 61851 (зарядные системы), ISO 26262 (функциональная безопасность автомобильных систем) задают нормативные рамки для проектирования и верификации систем безопасности. На постсоветском пространстве актуальной задачей является гармонизация национальных технических регламентов с международными стандартами, что обусловлено расширением импорта ЭТС и развитием собственного производства электрических транспортных средств.

Инфраструктура зарядки представляет самостоятельный и всё более значимый аспект безопасности. Быстрые зарядные станции постоянного тока мощностью до 350 кВт создают значительные электромагнитные помехи и требуют специализированной защиты кабельных трасс, разъёмных соединений и зарядных контроллеров от перегрузок и перенапряжений. Протоколы связи между транспортным средством и зарядной инфраструктурой (ISO 15118, CHAdeMO, CCS) включают криптографические механизмы аутентификации, исключающие несанкционированный доступ к высоковольтной цепи [4]. Кроме того, нарастающая роль интеллектуальных сетей (smart grid) обусловливает необходимость защиты от киберугроз зарядной инфраструктуры.

Перспективным направлением является разработка систем диагностики на основе цифровых двойников – виртуальных динамических моделей тяговых батарей и силовых цепей, функционирующих в режиме реального времени параллельно с реальными компонентами. Цифровые двойники позволяют выявлять деградацию элементов до возникновения отказов, оптимизировать ресурс батареи и планировать техническое обслуживание на основе предиктивного анализа данных. Интеграция таких систем с транспортными телематическими платформами открывает возможности для централизованного мониторинга безопасности крупных парков ЭТС, что особенно актуально для операторов городского электрического транспорта [5].

Отдельного внимания заслуживает проблема безопасности при авариях и чрезвычайных ситуациях. Высоковольтные батарейные системы создают специфические риски при дорожно-транспортных происшествиях: возможность короткого замыкания при механическом повреждении батарейного отсека, воздействие токсичных газов при тепловом разгоне, а также опасность повторного возгорания спустя значительное время после первоначального инцидента. Для минимизации данных рисков конструктивно предусматриваются автоматические системы разрыва цепи (pyrofuse, service disconnect), защитные корпуса батарей, соответствующие требованиям краш-тестов, и регламентированные алгоритмы действий аварийно-спасательных служб при ликвидации последствий ДТП с участием ЭТС.

Таким образом, современное развитие систем безопасности электротранспорта характеризуется следующими тенденциями: переходом от пассивных к активным и предиктивным системам защиты; интеграцией высоковольтной безопасности с функциональной безопасностью всего транспортного средства; применением методов искусственного интеллекта для анализа состояния батарей и прогнозирования отказов; развитием международной и национальной нормативной базы; созданием безопасной и защищённой от киберугроз зарядной инфраструктуры. Дальнейшее совершенствование данных направлений является необходимым условием надёжной и безопасной эксплуатации электротранспорта в условиях его масштабного внедрения.

Список литературы

1 **Etacheri, V.** Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review / V. Etacheri, R. Marom, R. Elazari // Energy Environ. Sci. – 2011. – Vol. 4, № 9. – P. 3243–3262.

2 **Feng, X.** Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review / X. Feng, M. Ouyang, X. Liu // Energy Storage Materials. – 2018. – Vol. 10. – P. 246–267.

3 **Olabi, A. G.** Critical review of energy storage systems / A. G. Olabi, C. Onumaegbu, T. Wilberforce // Energy. – 2021. – Vol. 214. – P. 118987.

4 ISO 15118-1:2019. Road vehicles – Vehicle to grid communication interface. – Geneva : ISO, 2019. – 78 p.

5 **Tao, F.** Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data / F. Tao, J. Cheng, Q. Qi // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2018. – Vol. 94. – P. 3563–3576.

УДК 629.3.083:614.8

ТЕХОСМОТР В ЯПОНИИ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТА И ВОЗМОЖНОСТЬ АДАПТАЦИИ ОПЫТА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

А. Н. ПОЖАРИЦКИЙ, И. А. ЗМУШКО, М. А. КИЛОЧИЦКАЯ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Обеспечение безопасности дорожного движения остается одной из приоритетных задач транспортной политики. В этом контексте представляет интерес опыт Японии, где технический осмотр транспортных средств (сякэн) трансформировался из формальной процедуры в действенный инструмент управления рисками.

К концу XX века интенсивный рост автомобильного парка Японии привел к ряду системных проблем. Увеличивалось количество дорожно-транспортных происшествий (в 1990 г. зафиксировано около 950 тыс. ДТП), значительная часть которых была связана с техническими неисправностями транспортных средств. Одновременно в крупных городских агломерациях (Токио, Осака, Нагоя) уровень загрязнения воздуха превышал санитарные нормы в 2–3 раза.

В свою очередь государство усилило нормативные требования, руководствуясь логикой управления рисками, а не наказания владельцев. Строгие проверки должны были не допускать к эксплуатации аварийно-опасные транспортные средства, которые не соответствуют экологическим требованиям. Главными целями реформ стали:

– снижение аварийности за счёт недопуска к эксплуатации опасных автомобилей;
– уменьшение вредных выбросов;
– стимулирование обновления автомобильного парка.

С 1 апреля 2025 года в Японии вступило в силу изменение: период, в течение которого допускается прохождение техосмотра, расширен с одного до двух месяцев до истечения срока действия сертификата, что позволяет владельцам планировать процедуру без риска сокращения срока действия нового сертификата.

Одной из особенностей японской системы техосмотра является освобождение новых легковых автомобилей от обязательного техосмотра в первые три года эксплуатации. Для некоторых категорий транспортных средств (грузовые автомобили, арендные машины) период может отличаться.

Такой подход связан с тем, что у нового автомобиля вероятность критических неисправностей в первые годы относительно невелика при условии своевременного обслуживания (при покупке автомобиля необходимо оформить обязательное страхование и выполнять плановое техническое обслуживание). Даже в период освобождения от обязательного техосмотра рекомендуется регулярно проводить диагностику и соблюдать требования производителя, поскольку ответственность за техническое состояние транспортного средства несет владелец.

После окончания льготного периода автомобиль должен проходить обязательный технический осмотр, включающий около 60 позиций проверяемых показателей, сгруппированных в четыре блока: ходовая часть (тормозная система, подвеска, рулевое управление); светотехника (фары, стоп-сигналы, поворотники); экологический контроль (токсичность выхлопных газов, содержание сажи); прочие системы (шины, стекла, зеркала, ремни безопасности, система выпуска). Отдельно контролируется соответствие нормам по шуму и выбросам (стандарты JIS D 0101–0108). По результатам проверки выдается специальная наклейка с датой следующего осмотра, которая размещается на лобовом стекле и является официальным подтверждением допуска автомобиля к эксплуатации.

Японский подход основан на профилактике риска, поэтому даже на первый взгляд небольшой дефект может стать причиной отказа в допуске к эксплуатации. Например, износ элемента рулевого управления, повреждение фары или неисправный стоп-сигнал могут свидетельствовать о более серьезных проблемах, которые способны проявиться непосредственно во время движения. Такая система заставляет владельца устранять неисправности заранее, а регулярная диагностика и своевременная замена расходных материалов позволяют избежать повторной проверки и дополнительных расходов на ремонт. В результате строгие требования формируют у автовладельцев культуру ответственности и привычку контролировать техническое состояние автомобиля.

Существует несколько вариантов прохождения проверки владельцем транспортного средства:

1) самостоятельно обратиться на авторизованную станцию техосмотра (такой вариант обычно дешевле, но требует больше времени и подготовки);

2) обратиться к дилеру или в сервисный центр (дороже, однако сервис может выполнить подготовку автомобиля и устранить обнаруженные небольшие неисправности).

Стоимость прохождения сякэн зависит от возраста автомобиля, типа двигателя, необходимости ремонта, а также от региональных сборов и пошлин. Если автомобиль не соответствует установленным требованиям, допуск к эксплуатации не выдается, владелец должен устранить выявленные проблемы и пройти повторную проверку. Система техосмотра в Японии экономически стимулирует обновление автопарка, поскольку содержание старых автомобилей требует всё больших затрат на проверки и ремонт, а наличие действующего сякэн существенно влияет на остаточную стоимость транспортного средства (автомобили без него теряют в цене до 30–40 %).

С увеличением возраста автомобиля требования к его эксплуатации становятся более строгими: для транспортных средств старше определенного возраста (в зависимости от категории) техосмотр может проводиться ежегодно, что создает дополнительный экономический стимул для владельцев и в определенных случаях становится выгоднее заменить автомобиль на более новый.

В результате система техосмотра Японии не только контролирует техническое состояние транспорта, но и способствует постепенному обновлению автомобильного парка, снижению среднего возраста автомобилей на дорогах и оказывает заметное влияние и на рынок подержанных автомобилей. Более молодые автомобили имеют преимущество, поскольку их содержание обходится дешевле, а старые, напротив, становятся менее привлекательными из-за возрастающих затрат на обслуживание. Часть автомобилей, экономически невыгодных для эксплуатации в Японии, экспортируется в страны с менее строгими требованиями к техническому состоянию, что напрямую затрагивает рынки России, Беларуси и других стран. Кроме того, история прохождения техосмотров повышает прозрачность вторичного рынка: покупатель получает объективную информацию о состоянии автомобиля и может принимать решение о покупке с учетом результатов предыдущих проверок.

Строгая система технического контроля имеет как преимущества, так и недостатки. Главное преимущество заключается в повышении безопасности: Япония демонстрирует один из самых низких показателей смертности на дорогах в мире – около 2,5–3 человек на 100 тыс. населения, что стало результатом комплексных мер, включая строгий технический контроль. Важное значение имеет и экологический эффект системы, проявляющийся в сокращении выбросов CO, NOx и твердых частиц. Контроль выхлопных газов способствует использованию более экологичных транспортных средств и стимулирует переход на гибридные и электрические автомобили. Однако для владельцев автомобилей такая система предполагает дополнительные расходы, поскольку необходимо оплачивать проверки, обслуживание и устранение выявленных неисправностей. Таким образом, возникает определенный компромисс: отдельный владелец несет дополнительные расходы, но общество получает преимущества в виде повышения безопасности и улучшения экологической ситуации.

Действующая в Республике Беларусь система государственного технического осмотра транспортных средств регулируется Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 630 [1] и требованиями Технического регламента Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» (ТР ТС 018/2011) [2]. Исходя из проведенного анализа, внедрение японской модели в республике невозможно из-за различий в структуре автопарка, уровне доходов населения и институциональной среде, однако целесообразно рассмотреть следующие направления адаптации японского опыта в сфере техосмотра.

1 Дифференциация периодичности техосмотра в зависимости от возраста транспортного средства, что позволит снизить административную нагрузку на владельцев новых автомобилей и сосредоточить контроль на потенциально опасных старых автомобилях.

2 Усиление экологического контроля с учетом европейских норм и постепенным переходом на более строгие стандарты выбросов.

3 Цифровизация учета посредством интеграции данных технического осмотра в единую информационную систему (по аналогии с японской), что повысит прозрачность и упростит контроль.

4 Экономические стимулы для обновления автопарка за счет разработки механизмов, делающих эксплуатацию старых автомобилей экономически менее выгодной по сравнению с приобретением новых.

Японская модель технического осмотра демонстрирует, что системный подход к контролю технического состояния транспортных средств позволяет одновременно решать задачи безопасности, экологии и обновления автопарка. Для Республики Беларусь представляет интерес не прямое копирование, а адаптация ключевых принципов в национальную систему технического осмотра.

Список литературы

1 Положение о порядке проведения государственного технического осмотра транспортных средств и их допуска к участию в дорожном движении : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 30 апреля 2008 г. // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C20800630 (дата обращения: 10.09.2026).

2 Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» : принят Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 877. – URL: https://reglament.by/wp-content/uploads/2018/05/TR-TS-018-2011-O-bezopasnosti-kolesnyh-transportnyhsredstv.pdf (дата обращения: 10.09.2026).

УДК 656.25+06

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР В СИСТЕМЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ И ПУТИ МИНИМИЗАЦИИ РИСКОВ

Н. А. РЕПЕШКО, В. В. ЧЕБОТАРЕВ, А. И. СТЕПОВАЯ, С. С. ГОВОРУХА
Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Несмотря на многократное повышение степени технической оснащённости железнодорожного транспорта, доля происшествий, в причинно-следственной цепи которых присутствуют действия или бездействие персонала, остаётся устойчиво высокой (рисунок 1). По данным Европейского агентства по железнодорожной безопасности (ERA), до 25 % значимых инцидентов на сети желез-

ных дорог государств – членов ЕС так или иначе связаны с ошибками на операционном уровне [1]. При этом изолированный анализ действий машиниста или диспетчера не позволяет выявить отдельную причину происшествий, поскольку ошибочное поведение на уровне непосредственного исполнителя зачастую обусловлено множественными дефектами в соблюдении регламентов, рабочих процедур, организационной культуры и управленческих решений, принятых значительно ранее и на иных иерархических уровнях.

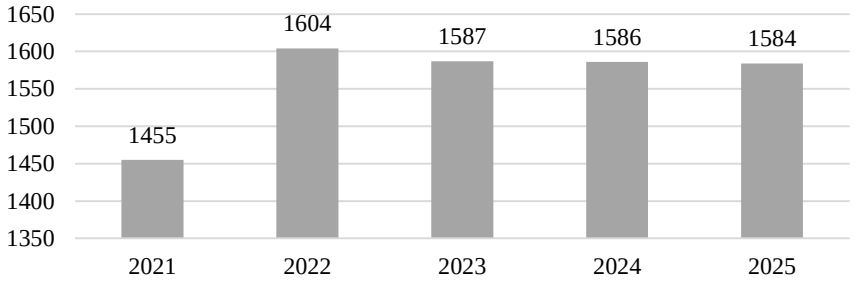


Рисунок 1 – Динамика транспортных происшествий, причиной которых стал человеческий фактор [1]

Подавляющая доля серьезных происшествий связана со случаями наезда подвижного состава на людей, столкновением поезда с препятствием, сходом подвижного состава, поражением током от контактного провода, происшествиями с опасными грузами без загрязнения окружающей среды и с ее загрязнением и др., и все эти случаи связаны с вопросами возникновения человеческого фактора, риски которого традиционно рассматриваются в отечественной и зарубежной практике эксплуатационной науки. Чаще всего выделяют следующие основные группы особенностей возникновения человеческого фактора.

1 Многоуровневая архитектура человеческого фактора.

Согласно модели Дж. Ризона аварийное событие возникает в результате совпадения «пробелов» в нескольких защитных барьерах, расположенных на различных уровнях организации [2]. Применительно к железнодорожному транспорту целесообразно выделить три уровня. На стратегическом уровне решения о финансировании модернизации инфраструктуры, формировании штатной численности и нормативах технического обслуживания принимаются руководством компаний и регулирующими органами. Дефицит инвестиций в профилактическое содержание пути и подвижного состава формирует латентные условия, которые могут реализоваться в виде отказов оборудования через месяцы или годы. На управленческом уровне диспетчерский аппарат и линейные руководители осуществляют оперативное планирование перевозочного процесса. Конфликт между целевыми показателями пунктуальности и требованиями безопасности создаёт системное давление, побуждающее персонал к сокращению продолжительности проверочных процедур [3]. На операционном уровне локомотивные бригады, составители поездов, путевые обходчики и ремонтный персонал непосредственно взаимодействуют с технической системой. Именно на данном уровне ошибка проявляется в наблюдаемой форме, однако её истоки, как правило, лежат глубже.

2 Психофизиологические детерминанты ошибочных действий локомотивных бригад.

Управление поездом массой в несколько тысяч тонн при скоростях до 200 км/ч предъявляет повышенные требования к психофизиологическому состоянию машиниста. К числу наиболее значимых факторов риска относятся следующие. Накопленная усталость приводит к десинхронизации циркадных ритмов. Установлено, что после 17–19 часов непрерывного бодрствования когнитивные и моторные функции оператора снижаются до уровня, сопоставимого с концентрацией алкоголя в крови 0,05 % [4]. Кратковременные эпизоды микросна длительностью 1–3 секунды, регистрируемые в условиях монотонной среды, способны привести к утрате контроля над поездом. Стресс и сужение внимания: в нештатных ситуациях активация симпатической нервной системы сопровождается феноменом туннельного восприятия, при котором оператор сосредоточивается на одном источнике угрозы, игнорируя параллельно поступающую информацию. Кроме того, распространены предвзятость подтверждения (игнорирование информации, противоречащей сложившимся ожиданиям) и эффект якорения (избыточная опора на первую полученную информацию) [5].

3 Организационно-управленческие детерминанты рисков.

Ошибки операционного персонала не существуют изолированно от организационного контекста. Ключевыми факторами выступают давление расписания и состояние культуры безопасности. Когда система мотивации персонала преимущественно ориентирована на соблюдение графика, а отклонения от него влекут дисциплинарные санкции, у работников формируется рациональная (с их точки зрения) стратегия сокращения продолжительности предпоездных проверок и превышения скоростных ограничений на отдельных участках. В коллективах с низким уровнем психологической безопасности сотрудники склонны замалчивать выявленные дефекты оборудования, опасаясь негативных последствий для себя. Формируется групповая норма, при которой несоблюдение отдельных требований рассматривается как допустимая практика [6].

4 Взаимодействие оператора и автоматизированных систем.

Внедрение автоматизированных систем контроля скорости и принудительного торможения (ETCS, КЛУБ-У и аналоги) существенно повышает защищённость перевозочного процесса, однако порождает специфические риски. При длительной безотказной работе автоматики у машиниста формируется эффект самоуспокоенности, выражающийся в снижении уровня активного наблюдения за сигнальными показаниями. В случае отказа датчика или программного сбоя оператор, утративший ситуационную осведомлённость, не успевает своевременно вмешаться в управление [7].

На основании опыта передовых железнодорожных компаний можно сформулировать комплекс мер, охватывающий все выделенные уровни, в т. ч. совершенствование системы отбора, подготовки и непрерывной переподготовки локомотивных бригад с широким использованием тренажёрных комплексов, моделирующих нештатные ситуации; регламентация режимов труда и отдыха с применением инструментальных средств мониторинга состояния бдительности; внедрение механизмов добровольного безымянного информирования об угрозах и пересмотра систем материального стимулирования в сторону приоритета безопасности над пунктуальностью; выявление организационных причин, а не поиск виновного исполнителя. Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на вопросах адаптивной автоматизации и предиктивной аналитики, позволяющей заблаговременно выявлять состояния повышенного риска.

Список литературы

1 European Union Agency for Railways. Railway Safety in the European Union : Safety Overview 2022. – Valenciennes : ERA, 2022. – 84 p.

2 **Ризон, Дж**. Человеческая ошибка / Дж. Ризон. – Кембридж : Cambridge University Press, 1990. – 302 с.

3 Rail Safety and Standards Board. Human Factors Handbook. – London : RSSB, 2014. – 112 p.

4 **Rasmussen, J.** Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models / J. Rasmussen // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1983. – Vol. SMC-13, №. 3. – P. 257–266.

5 **Shappell, S. A.** The Human Factors Analysis and Classification System – HFACS / S. A. Shappell, D. A. Wiegmann. – Washington : DOT/FAA/AM-00/7, 2000. – 89 p.

6 **Williamson, A. M.** Moderate sleep deprivation produces impairments in cognitive and motor performance equivalent to legally prescribed levels of alcohol intoxication / A. M. Williamson, A.-M. Feyer // Occupational and Environmental Medicine. – 2000. – Vol. 57, № 10. – P. 649–655.

7 **Hollnagel, E.** Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management / E. Hollnagel. – Farnham : Ashgate, 2014. – 194 p.

УДК 004.93′-12:656.2

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ВАГОННОГО ПАРКА НА ОСНОВЕ СИСТЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ МАРКИРОВКИ

Е. А. САВВИНА, В. М. ВАСЕЧКИН
Воронежский государственный университет инженерных технологий (ВГУИТ), Российская Федерация

Введение. Учёт и контроль вагонного парка являются одной из базовых технологических операций железнодорожного транспорта, от достоверности которой зависят планирование перевозочного процесса, взаиморасчёты за пользование подвижным составом, претензионная работа и экономическая безопасность перевозок. Каждой подвижной единице грузового парка присваивается уникальный восьмизначный инвентарный номер, последняя цифра которого является контрольной

и служит для проверки корректности ввода номера в перевозочные документы [1]. Несмотря на длительную историю автоматизации отрасли, значительная доля операций контроля до настоящего времени выполняется в ручном (визуальном) режиме, что обусловливает высокую трудоёмкость, низкую оперативность и зависимость результата от человеческого фактора.

Актуальность исследования определяется ростом интенсивности грузовых перевозок и требований к цифровизации транспортных процессов. Ручной учёт не обеспечивает требуемой скорости обработки на пунктах контроля и сопряжён с ошибками считывания, особенно при загрязнённой, изношенной или нестандартно нанесённой маркировке. Внедрённая на сети ОАО «РЖД» система автоматической идентификации подвижного состава САИ ПС «Пальма» на основе радиочастотных кодовых бортовых датчиков повысила оперативность учёта, однако обладает ограничениями: датчиками оборудовано лишь около 20 % грузовых вагонов, а вероятность распознавания датчика составляет порядка 0,86 [2]. Это создаёт предпосылки для применения альтернативного подхода – видеоаналитических систем оптического распознавания маркировки на основе компьютерного зрения и нейронных сетей, не требующих оснащения каждой подвижной единицы дополнительным оборудованием.

Цель работы – оценка эффективности внедрения автоматизированного контроля вагонного парка на основе систем распознавания маркировки в сравнении с традиционными способами учёта.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1) провести системный анализ процесса контроля вагонного парка и выделить его ключевые показатели эффективности;

2) формализовать сравнительную модель трёх вариантов организации учёта: ручного, радиочастотного и видеоаналитического;

3) оценить точность, производительность и устойчивость распознавания маркировки нейросетевыми методами по данным литературы и промышленной практики;

4) выполнить расчёт ожидаемого экономического эффекта и срока окупаемости внедрения системы распознавания;

5) сопоставить полученные результаты с данными других исследований, выявить ограничения и обосновать практическую значимость работы.

Объектом исследования выступает процесс контроля и идентификации подвижного состава на пунктах учёта, предметом – показатели эффективности автоматизированного контроля на основе оптического распознавания инвентарной маркировки.

Методологической основой работы являются системный анализ процесса контроля вагонного парка и математическое моделирование его показателей. Исследование носит расчётно-аналитический характер: эмпирические оценки точности и производительности распознавания приняты по опубликованным результатам научных и отраслевых источников, а интегральные показатели эффективности получены аналитически на основе сравнительной модели вариантов организации учёта.

Процесс контроля вагонного парка декомпозирован на последовательность функциональных этапов: фиксация прохождения подвижной единицы, считывание (распознавание) инвентарного номера, верификация номера по контрольной цифре, сверка с базой данных и формирование учётной записи.

Для каждого этапа определены управляемые показатели: точность идентификации, время обработки одной единицы, доля операций, требующих ручного вмешательства, и удельные эксплуатационные затраты. Системный анализ выполнен в логике «вход – процесс – выход» с выделением источников погрешности (человеческий фактор при ручном учёте, отказ датчика при радиочастотной идентификации, дефекты маркировки и условия съёмки при видеоаналитике).

Сопоставление вариантов организации учёта проводится по трём альтернативам: В1 – ручной (визуальный) учёт оператором; В2 – радиочастотная идентификация (САИ ПС «Пальма») на основе кодовых бортовых датчиков; В3 – видеоаналитический учёт на основе нейросетевого оптического распознавания маркировки. Состав показателей сравнения приведён в таблице 1.

Таблица 1 – **Показатели сравнения вариантов организации учёта**

Показатель	Вариант организации учета		
	В1 (ручной)	В2 (РЧИ)	В3 (видео)
Источник идентификатора	Оператор	Бортовой датчик	Оптическая маркировка
Оснащение каждой единицы	Не требуется	Требуется	Не требуется
Основной источник ошибок	Человеческий фактор	Отказ/отсутствие датчика	Дефекты маркировки, освещение
Режим работы	Дискретный	В реальном времени	В реальном времени
Верификация	Ручная	Аппаратная	Контрольная цифра + ПО

Точность идентификации варианта определяется как доля корректно установленных номеров от общего числа прошедших подвижных единиц:

$$A = N_{\text{верн}} / N_{\text{общ}} \cdot 100\ \%, \quad (1)$$

где A – точность идентификации, %; $N_{\text{верн}}$ – число верно распознанных номеров; $N_{\text{общ}}$ – общее число подвижных единиц, прошедших пункт контроля.

Для нейросетевого распознавания дополнительно учитываются стандартные метрики качества: точность (precision), полнота (recall) и их гармоническое среднее (F-мера), вычисляемые через число истинно-положительных (TP), ложноположительных (FP) и ложноотрицательных (FN) исходов:

$$P = TP / (TP + FP);\ R = TP / (TP + FN);\ F1 = 2PR / (P + R). \quad (2)$$

Производительность пункта контроля оценивается пропускной способностью $Q = 3600 / \tau$, где τ – среднее время обработки одной подвижной единицы, с. Относительный прирост производительности при переходе от ручного учёта к автоматизированному выражается коэффициентом ускорения $k = \tau1 / \tau2$, где $\tau1$ и $\tau2$ – время обработки до и после внедрения.

Оценка экономической эффективности выполнена по типовой методике определения эффекта от внедрения средств автоматизаци [3]. Ожидаемый годовой экономический эффект рассчитывается как разность годовой экономии и приведённых капитальных затрат:

$$Э = Э_р - Е_н К_п, \quad (3)$$

где Э – ожидаемый экономический эффект, руб./год; $Э_р$ – годовая экономия эксплуатационных расходов и затрат труда; $Е_н$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, $Е_н = 0{,}15$; $К_п$ – капитальные затраты на проектирование и внедрение системы.

Срок окупаемости капитальных вложений определяется как $T_{ок} = К_п / Э_р$ и сопоставляется с нормативным сроком окупаемости $T_н$. Вариант внедрения признаётся экономически эффективным при $T_{ок} \le T_н$. Годовая экономия $Э_р$ формируется за счёт снижения трудоёмкости операций контроля, сокращения числа ошибок учёта и связанных с ними потерь, а также ускорения обработки подвижного состава на пунктах контроля.

По результатам сопоставления вариантов организации учёта установлено, что видеоаналитические системы на основе нейросетевого распознавания обеспечивают наиболее высокую точность идентификации. Согласно отраслевым данным, для номеров вагонов на типовом составе при нормальном качестве маркировки точность распознавания составляет 93–98 %, а при благоприятных условиях съёмки приближается к 100 % [4]. В исследовании двухэтапной методологии на основе компьютерного зрения и глубокого обучения достигнута точность подсчёта вагонов 100 % и средний показатель распознавания номеров 99,7 % на реальных видеозаписях высокого разрешения [5]. Для сравнения, радиочастотная идентификация САИ ПС «Пальма» характеризуется вероятностью распознавания датчика порядка 0,86 при оснащённости датчиками лишь около 20 % грузовых вагонов [6]. Сводные показатели приведены в таблице 2.

Таблица 2 – **Сравнительные показатели вариантов организации учёта**

Показатель	Вариант организации учёта		
	В1 (ручной)	В2 (РЧИ)	В3 (нейросетевое распознавание)
Точность идентификации, %	90–95*	≈86	93–99,7
Скорость обработки	Низкая	Высокая	Высокая (в 3–5 раз выше ручной)
Влияние человеческого фактора	Высокое	Низкое	Низкое
Оснащение единицы	Нет	Датчик КБД	Нет
Работа в реальном времени	Нет	Да	Да
* Оценка для ручного учёта приведена по экспертным данным и зависит от утомляемости оператора и условий наблюдения.			

Видеоаналитические системы работают в режиме реального времени и ускоряют обработку и передачу учётных данных в 3–5 раз по сравнению с ручным режимом [7]. Нейросетевые модели находят расположение номера в кадре автоматически и распознают даже частично стёртые символы, что обеспечивает устойчивость к загрязнению и износу маркировки, характерным для эксплуатационных условий российских железных дорог. Считывание номера с двух сторон состава с последующим объединением результатов и проверкой по контрольному значению (контрольной цифре) дополнительно повышает достоверность учёта. При неблагоприятных условиях (резкие перепады освещённости, блики, частичное перекрытие маркировки элементами конструкции) точность снижается до 87–93 %, что определяет требования к размещению камер, освещению и датчикам фиксации колёсных пар.

Расчёт экономического эффекта по формуле (3) выполнен на условном примере пункта контроля. Принято: годовая экономия эксплуатационных расходов и затрат труда за счёт снижения трудоёмкости, сокращения ошибок учёта и ускорения обработки $Э_р$ = 1 200 000 руб./год; капитальные затраты на оборудование, программное обеспечение и пусконаладку $К_п$ = 1 800 000 руб.; нормативный коэффициент $Е_н$ = 0,15. Тогда ожидаемый годовой экономический эффект

$$Э = 1\,200\,000 - 0{,}15 \cdot 1\,800\,000 = 930\,000 \text{ руб./год}, \qquad (4)$$

а срок окупаемости $T_{ок}$ = 1 800 000 / 1 200 000 = 1,5 года, что не превышает типового нормативного срока окупаемости средств автоматизации. Результаты расчёта сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – **Результаты расчёта экономической эффективности (условный пример)**

Параметр	Значение
Годовая экономия $Э_р$, руб./год	1 200 000
Капитальные затраты $К_п$, руб.	1 800 000
Нормативный коэффициент $Е_н$	0,15
Годовой экономический эффект Э, руб./год	930 000
Срок окупаемости $T_{ок}$, лет	1,5
Примечание – Значения приняты как иллюстративные для демонстрации методики расчёта; в практических задачах используются фактические данные конкретного пункта контроля.	

Полученные результаты подтверждают, что нейросетевые методы распознавания маркировки превосходят как ручной учёт, так и радиочастотную идентификацию по совокупности показателей. Преимущество над радиочастотной идентификацией обусловлено двумя факторами: видеоаналитика не требует оснащения каждой подвижной единицы дополнительным бортовым датчиком и обеспечивает более высокую вероятность корректной идентификации (93–99,7 % против ≈0,86). Это согласуется с выводами исследований в области компьютерного зрения, где системы автоматического подсчёта и идентификации вагонов на основе глубокого обучения позиционируются как экономически выгодная замена RFID-решений с высокими затратами на установку и обслуживание [8].

Сопоставление с отраслевой практикой показывает близость полученных оценок точности к промышленным: для контейнерной маркировки по стандарту ISO 6346 (идентичный ГОСТ Р 52524–2019) качество распознавания достигает 99 %, для номеров вагонов – 93–98 % при нормальном качестве маркировки [9]. Совпадение диапазонов свидетельствует о корректности принятой модели и репрезентативности использованных данных.

Снижение влияния человеческого фактора является ключевым качественным эффектом: автоматическая регистрация исключает ошибки оператора, упрощает претензионную работу и повышает экономическую безопасность перевозок. Экономический анализ показывает, что при приемлемых капитальных затратах внедрение обеспечивает положительный годовой эффект и срок окупаемости в пределах нормативного, что подтверждает экономическую целесообразность автоматизации.

Ограничения исследования. Во-первых, экономический расчёт носит иллюстративный характер и опирается на условные исходные данные; для конкретного объекта требуется уточнение по фактическим показателям. Во-вторых, точность распознавания существенно зависит от условий эксплуатации – при бликах, перепадах освещённости и сильном износе маркировки она снижается до 87–93 %, что требует инженерных мер (выбор и размещение камер, освещение, датчики колёсных пар). В-третьих, оценки точности приняты по литературным и отраслевым источникам; верификация на собственном репрезентативном наборе изображений вагонов является направлением дальнейшей работы. Наконец, видеоаналитика и радиочастотная идентификация не являются взаимоисключающими – их комбинирование (гибридная схема) способно компенсировать недостатки каждого подхода.

Значимость работы состоит в систематизации показателей эффективности автоматизированного контроля вагонного парка и обосновании выбора видеоаналитического распознавания маркировки как приоритетного направления цифровизации. Результаты могут быть использованы при проектировании пунктов автоматического учёта и технико-экономическом обосновании их внедрения.

В работе выполнена оценка эффективности внедрения автоматизированного контроля вагонного парка на основе систем распознавания маркировки. Проведён системный анализ процесса контроля, построена сравнительная математическая модель трёх вариантов организации учёта и рассчитан ожидаемый экономический эффект.

На основе полученных результатов сформулированы следующие выводы:

1) нейросетевые методы оптического распознавания маркировки превосходят радиочастотную идентификацию и ручной учёт, обеспечивая точность идентификации 93–99,7 % против вероятности ≈0,86 у радиочастотной системы;

2) автоматизация повышает точность и скорость обработки подвижного состава – видеоаналитические системы работают в реальном времени и ускоряют обработку данных в 3–5 раз по сравнению с ручным учётом;

3) внедрение систем распознавания существенно снижает влияние человеческого фактора, исключая ошибки оператора и упрощая претензионную работу;

4) расчёт по типовой методике подтверждает положительный годовой экономический эффект и срок окупаемости в пределах нормативного, что свидетельствует об экономической целесообразности внедрения.

Таким образом, автоматизация контроля вагонного парка на основе систем распознавания маркировки является эффективным направлением цифровизации железнодорожного транспорта, обеспечивающим одновременно технологический и экономический выигрыш. Перспективы дальнейших исследований связаны с экспериментальной верификацией нейросетевой модели на репрезентативном наборе изображений и разработкой гибридных схем, сочетающих оптическое и радиочастотное распознавание.

Список литературы

1 Нумерация вагонов грузового парка // ООО «УК РМ Рейл». – URL: https://rmrail.ru/poleznaya-informatsiya/numeratsiya-vagonov-gruzovogo-parka (дата обращения: 09.06.2026).

2 Система автоматической идентификации подвижного состава (САИ) «Пальма» // To-Inform. – URL: http://www.to-inform.ru (дата обращения: 09.06.2026).

3 Расчёт экономического эффекта от внедрения системы автоматизации // Antegra. – URL: https://antegra.ru/expert/raschet-ekonomicheskogo-effekta-ot-vnedreniya-sistemy-avtomatizatsii/ (дата обращения: 09.06.2026).

4 Как внедрить распознавание номеров контейнеров и вагонов в 2025 году // Интемс. – URL: https://securityrussia.com/blog/raspoznavanie_konteynerov_i_nomerov_vagonov_v_2025.html (дата обращения: 09.06.2026).

5 **Laroca, R.** Automatic Counting and Identification of Train Wagons Based on Computer Vision and Deep Learning / R. Laroca, A. Cidral Boslooper, D. Menotti // arXiv:2010.16307. – URL: https://raysonlaroca.github.io/ papers/laroca2020automatic.pdf (дата обращения: 09.06.2026).

6 Распознавание номеров Ж/Д вагонов и контейнеров (Vmx MarkerID: WNR) // Videomatrix. – URL: https://videomatrix.ru/solutions/nomera_vagonov/ (дата обращения: 09.06.2026).

УДК 656.7.08:625

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА НАД ОБЪЕКТАМИ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

М. В. САКОВИЧ, М. В. КРУК, В. В. ПЕТРУСЕВИЧ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В современную эпоху глобальной цифровизации и стремления к технологическому суверенитету наблюдается стремительная и необратимая интеграция беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в ключевые социально-экономические процессы. Эти устройства, которые раньше использовались преимущественно в оборонном секторе, сегодня становятся многофункциональными инструментами, применяемыми в таких областях, как мониторинг окружающей среды, логистика, сельское хозяйство, связь и даже в экстренных службах. Однако с расширением возможностей гражданского применения БПЛА возникает необходимость в создании защищенных зон над объектами критической инфраструктуры, что требует более глубокого анализа потенциальных рисков и угроз, связанных с их использованием.

К числу наиболее уязвимых и стратегически значимых объектов относятся автомобильные дороги общегопользования. Эти дороги не только обеспечивают связность территорий, но и способствуют стабильности грузопассажирских потоков, что делает их критически важными для функционирования экономики. Учитывая это, необходимо углубленное изучение технологических, нормативных и организационных аспектов развертывания систем защиты воздушного пространства, которые становятся основой для обеспечения транспортной безопасности нового поколения.

Особое внимание следует уделять интеграции новых технологий в существующие инфраструктурные решения, а также оценке рисков, возникающих при взаимодействии БПЛА и автомобильного движения. Такой подход позволит повысить уровень безопасности и устойчивости транспортных систем в долгосрочной перспективе.

Транспортная отрасль переживает масштабную трансформацию, ориентированную на автоматизацию и внедрение интеллектуальных систем. Важно отметить, что рост числа БПЛА в частном и коммерческом секторах приводит к возникновению новых векторов угроз. Низковысотный сегмент воздушного пространства, непосредственно прилегающий к автомагистралям, мостам и путепроводам, долгое время оставался вне зоны активного контроля.

Однако в условиях увеличения интенсивности полетов БПЛА, его защита становится приоритетной государственной задачей. Создание эффективной системы контроля воздушного движения требует инновационных методов и постоянного обновления технических средств, что способствует своевременному распознаванию и устранению угроз.

Современные системы защиты представляют собой сложную многоуровневую архитектуру, которая включает в себя радиолокационные, оптико-электронные и акустические средства. Эти системы работают в непрерывном цикле обнаружения, идентификации и нейтрализации целей. Эффективность таких систем заключается в своевременном выявлении потенциальных угроз, что позволяет минимизировать риски возникновения чрезвычайных ситуаций и предотвратить любые формы несанкционированного вмешательства в функционирование транспортных артерий.

Необходимость системного подхода к защите неба над автодорогами продиктована несколькими ключевыми факторами. На первом месте стоит обеспечение техносферной безопасности. В условиях высокой интенсивности движения даже незначительный технический сбой в работе БПЛА или ошибка оператора могут привести к падению аппарата на проезжую часть, создавая риск тяжелых дорожно-транспортных происшествий (ДТП) с эффектом цепной реакции. Поэтому мониторинг воздушного пространства позволяет заранее предупреждать системы управления движением о возможных инцидентах.

Также важно учитывать антитеррористическую защищенность. Стратегические объекты инфраструктуры, такие как мосты и тоннели, могут стать целями для доставки опасных грузов или объектами промышленного шпионажа. Защитные системы в этом контексте выступают в роли превентивного барьера, исключая возможность скрытного проникновения в охраняемую зону и сбор данных о перемещении специальных грузов.

Актуальным является вопрос регуляции трафика в рамках концепции интеллектуальных транспортных систем, где наземный транспорт и легальные беспилотные летательные аппараты должны сосуществовать в едином цифровом пространстве. Системы защиты необходимы для упорядочивания полетов, верификации планов и оперативного пресечения деятельности нарушителей, которые игнорируют установленные регламенты. Мировая практика подтверждает этот тренд, демонстрируя переход от локальных средств к распределённым сетям контроля, таким как системы динамического геозонирования, которые активно тестируются в Европе и Северной Америке.

В крупнейших мегаполисах внедряются платформы ситуационной осведомленности, использующие алгоритмы машинного обучения для предиктивного анализа. Эти платформы способны предсказывать траекторию движения нарушителя еще до момента его входа в критическую зону, что позволяет заранее реагировать на потенциальные угрозы.

Несмотря на наличие множества технологических решений, процесс полномасштабного внедрения систем защиты сталкивается с серьезными техническими и правовыми вызовами. Обнаружение малоразмерных целей, таких как БПЛА, может быть крайне затруднено в условиях плотной городской застройки и высоких уровнях электромагнитного шума, что часто приводит к ложным срабатываниям систем.

Кроме того, во многих правовых системах отсутствует гармонизированная нормативная база, регулирующая право гражданских структур на использование средств активного подавления и радиоэлектронной борьбы. Вопросы легитимности перехвата управления или физического устранения БПЛА-нарушителя остаются дискуссионными. Эти проблемы усугубляются сложностями межведомственного взаимодействия и отсутствием единых протоколов обмена данными между дорожными службами и государственными органами безопасности.

Для решения задачи обеспечения безопасности воздушного пространства над объектами дорожно-транспортной инфраструктуры необходимо внедрение интегрированной системы, которая объединяет современные технологические решения с организационными мерами и нормативным регулированием. Основным элементом такого подхода станет создание многоуровневой платформы управления, способной обеспечить комплексный контроль и защиту воздушного пространства. Важной составляющей системы является многоаспектное обнаружение и мониторинг, реализуемое с помощью различных сенсорных технологий: радиолокационных, инфракрасных, акустических и оптико-электронных. Интеграция данных с этих устройств в единую систему обработки повышает точность выявления объектов и снижает количество ложных срабатываний. Кроме того, использование алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта позволяет анализировать поведение воздушных аппаратов, прогнозировать опасные траектории и своевременно формировать предупреждения, что снижает риски аварий и инцидентов.

Для эффективного управления воздушным движением дронов и предотвращения несанкционированного проникновения в критические зоны предлагается внедрение цифровых «безопасных зон» и систем динамического геозонирования, которые позволяют упорядочить трафик и автоматизировать блокировку доступа к охраняемым объектам. Важным элементом стратегии является комплексная интеграция системы контроля воздушного пространства с центрами управления движением и экстренными службами, обеспечивающая оперативный обмен информацией и координацию действий при возникновении угроз. Не менее значимым аспектом является разработка и внедрение нормативно-правовой базы, регулирующей права и обязанности операторов беспилотников, а также процедуры реагирования на нарушения. Для повышения эффективности системы особое внимание уделяется обучению кадров и проведению информационных кампаний среди пользователей дронов, направленных на соблюдение правил и повышение безопасности воздушного пространства.

В конечном итоге развертывание комплексных систем защиты воздушного пространства над автомобильными дорогами является неотъемлемым элементом стратегии развития безопасной транспортной среды будущего. Дальнейшее развитие отрасли потребует не только совершенствования аппаратной части и повышения чувствительности сенсоров, но и разработки детализированных нормативно-правовых актов, а также стандартизации протоколов автоматического реагирования, которые исключают человеческий фактор.

Только синергия технологических инноваций, законодательных инициатив и четкой организационной структуры позволит создать устойчивый фундамент для эффективного сосуществования наземного транспорта и стремительно развивающихся БПЛА. Это станет ключевым аспектом для обеспечения безопасности и устойчивости транспортной инфраструктуры в условиях быстро меняющегося мира.

УДК 004.032.26:629.4

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ КОЛЕСНЫХ ПАР

В. Ю. СМИРНОВ, А. Ю. АРТЁМОВ, С. М. ГОСПОДИНОВА
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Безопасность и эффективность эксплуатации железнодорожного подвижного состава во многом определяются своевременностью выявления дефектов колесных пар. Традиционный контроль требует значительных трудозатрат специалистов и не всегда обеспечивает единообразную оценку большого объема фотофиксации, поступающей с придорожных систем мониторинга. Человеческий фактор, утомляемость и субъективность визуального осмотра создают риски пропуска развивающихся дефектов. Перспективным направлением является автоматизация первичного визуального контроля с помощью методов компьютерного зрения. Целью работы является создание программного обеспечения, позволяющего по изображению колесной пары автоматически обнаруживать визуально выраженные дефекты и представлять результат в удобной для специалиста форме, сокращая время на рутинный просмотр.

В качестве базовой архитектуры используется модель YOLOv8-seg [1], предварительно обученная на универсальном наборе изображений. Прямое обучение такой модели на специализированных данных о дефектах колесных пар приводит к потере ранее усвоенных признаков и нестабильным результатам. Для решения этой проблемы применяется поэтапное дообучение: сначала настраиваются только выходные слои модели, отвечающие за распознавание дефектов, при сохранении основных признаков. Затем выполняется более точная настройка всей модели с пониженной скоростью обучения.

Процесс дообучения нейросети для распознавания дефектов строится на принципе сравнения предсказаний модели с целевыми ответами. На вход модели подаются цифровые изображения колесных пар, на которых заранее выделены все дефекты и указан их тип. Далее точно выделяется форма объекта, т. е. осуществляется сегментация. Обучаемая модель делает собственное предсказание: где по её расчетам находятся дефекты и к какому классу они относятся, после чего вычисляется расхождение предсказания с ранее проделанной разметкой, указывающей наиболее верный целевой результат. Таким образом, модель корректирует свои внутренние параметры, чтобы на следующем изображении допустить меньше ошибок. Математически используется функция потерь Dice Loss, которая оценивает степень совпадения предсказанной маски с целевой маской:

$$L_{seg} = 1 - \frac{2 \cdot \left| M_{pred} \cap M_{true} \right|}{\left| M_{pred} \right| + \left| M_{true} \right|},$$

где M_{pred} – пиксельная маска, предсказанная моделью; M_{true} – маска, размеченная, как эталон (искомая в идеале область); $|\,M\,|$ – число пикселей в маске.

Чем точнее модель выделяет форму дефекта, тем ближе значение функции потерь к нулю. Цикл повторяется на всём наборе обучающих данных в течение нескольких эпох до тех пор, пока точность модели не перестанет расти.

В ходе тестирования оценивалось, насколько точно модель находит дефекты и определяет их границы. Оценка качества работы модели проводилась по стандартным метрикам компьютерного зрения: precision (точность – доля корректно найденных дефектов среди всех обнаруженных) и recall (полнота – доля реально существующих дефектов, которые модель смогла обнаружить), а также по их усредненному значению (mAP), дающему общую оценку надежности модели. Дополнительно производился визуальный анализ типичных ошибок: фиксировались пропуски мелких трещин, неточное определение границ дефекта, срабатывания на загрязнениях или тенях. Это позволяет понять ограничения модели и наметить направления повышения её точности перед передачей результатов специалисту-дефектоскописту.

Дополнительно проведен анализ стандартных методов искажения обучающих изображений. Установлено, что агрессивные преобразования разрушают структуру тонких дефектов, таких как трещины. В связи с этим применяются только преобразования, имитирующие реальные условия

съемки: изменение яркости, контраста и добавление незначительного шума. Такой подход обеспечивает устойчивость модели к вариациям освещения и загрязнениям поверхности колеса.

Автоматическое распознавание дефектов колесных пар выполняется в два этапа. На первом этапе на входном изображении автоматически определяется граница колеса, при этом объектом контроля является также ее внутренняя область. На втором этапе программа анализирует поверхность колеса в пределах найденной области, выделяет участки с отклонениями от нормы и классифицирует каждый обнаруженный дефект по типу (трещина, выкрашивание, аномальное цветовое изменение). В отличие от простого обнаружения, когда модель лишь рисует прямоугольник вокруг дефекта, в данной реализации распознавания дефектов точно выделяется их форма – строится пиксельная маска.

Основным результатом работы программы является набор обнаруженных дефектов, каждый из которых математически описывается следующим образом:

$$d_i = \left(M_{ij},\ c_i, p_i\right), i = 1, 2, \ldots, N,$$

где M_{ij} – бинарная пиксельная маска i-го дефекта (равна 1, если пиксель $\left(x_j, y_j\right)$ принадлежит дефекту, и 0 в противном случае); c_i – класс дефекта; p_i – уверенность модели в классификации; N – общее число обнаруженных дефектов.

В дополнение к основному результату вводится простой показатель суммарной выраженности обнаруженных дефектных областей:

$$I_{sum} = \sum_{i=1}^{N} w_i \cdot c_i \cdot \frac{S_i}{S},$$

где N – число обнаруженных областей; w_i – весовой коэффициент класса дефекта; c_i – уверенность модели; S_i – площадь i-й области в пикселях; S – площадь видимой поверхности колеса на изображении. Данный показатель используется как инструмент интеллектуальной сортировки: он позволяет специалисту-дефектоскописту, в первую очередь, проверять наиболее вероятные и критичные случаи, исключая необходимость сплошного ручного просмотра тысяч исправных изображений. Финальное юридическое и техническое решение о состоянии колесной пары всегда остается за сертифицированным экспертом, что полностью соответствует отраслевым стандартам безопасности.

Программное обеспечение реализовано на языке Python с использованием фреймворка PyTorch. Для обучения и проверки алгоритмов использованы открытые репрезентативные наборы данных FaultSeg [2] и BogieSeg [3]. Ключевым методологическим требованием, критически важным для промышленного внедрения, является строгое разделение данных по уникальному идентификатору колесной пары (wheel ID), а не случайное распределение отдельных кадров. Это исключает риск перетекания данных (data leakage), когда соседние кадры колесных пар попадают одновременно в обучающую и тестовую выборки. Исключение подобного риска обеспечивает релевантную оценку обобщающей способности модели.

Ключевыми преимуществами предлагаемого подхода является переход от простого факта обнаружения дефекта к его количественной оценке через показатель суммарной выраженности обнаруженных дефектных областей и обеспечение высокой надежности модели за счет специализированной методологии обучения, исключающей переобучение. Преимуществом также является возможность использования вычислительных ресурсов персонального компьютера без создания дорогостоящих лабораторных стендов, с возможностью бесшовной интеграции модуля в существующий контур технического контроля через API.

Практическая значимость предлагаемого подхода заключается в сокращении объема ручного просмотра изображений, быстром выделении потенциально дефектных участков и формировании единообразного структурированного результата для последующей верификации специалистом (human-in-the-loop). Программный модуль ориентирован на интеграцию в контур автоматизированного контроля локомотивных депо и центров технической диагностики подвижного состава, включая структурные подразделения ОАО «РЖД» и профильные организации, такие как ВНИИЖТ.

Следующим этапом развития системы станет накопление истории результатов для конкретных колесных пар и организация процесса дообучения модели на сложных случаях (active learning).

В долгосрочной перспективе возможно расширение входных данных за счёт вибрационных и акустических сигналов, что позволит перейти от отдельного анализа статичных изображений к комплексному мониторингу технического состояния.

Список литературы

1 **Jocher, G.** Ultralytics YOLOv8 / G. Jocher, A. Chaurasia, J. Qiu // GitHub. 2023. – URL: https://github.com/ultralytics/ultralytics (дата обращения: 14.09.2026).

2 **Shaikh, M. Z.** FaultSeg: A Dataset for Train Wheel Defect Detection / M. Z. Shaikh, S. Jatoi // Scientific Data. – 2025. – Vol. 12. – URL: https://www.researchgate.net/publication/389173240_FaultSeg_A_Dataset_for_Train_Wheel_Defect_Detection (дата обращения: 14.09.2026).

3 BogieSeg: A Dataset for Railway Bogie Component and Wheel Defect Detection / M. Z. Shaikh, E. Nava Baro, B. Abro [et al.]. – Zenodo, 2026. – URL: https://zenodo.org/records/18831526 (date of access: 14.09.2026).

УДК 656.25:004.8

ОЦЕНКА РИСКОВ И ВЕРОЯТНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРЕПЯТСТВИЙ СИСТЕМАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ТРАМВАЙНЫХ ВАГОНОВ

А. Е. СОРОКИН
СПб ГУП «Горэлектротранс», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Введение. Проблема доказательства надежности технических систем, оснащенных средствами машинного обучения, остается одной из наиболее сложной в современной инженерии [1, 2]. Традиционные подходы, базирующиеся на классической теории надежности и концепции «опасного отказа» [3, 4], не в полной мере учитывают специфику алгоритмов машинного обучения, которые могут демонстрировать непредсказуемое поведение в ситуациях, не представленных в обучающих выборках. В отличие от детерминированных систем, системы ИИ характеризуются вероятностной природой принимаемых решений, что требует разработки новых методов оценки их функциональной безопасности [5]. Особую актуальность эта проблема приобретает для ГНЭРТ, функционирующего в условиях плотного смешанного транспортного потока и подверженного влиянию многочисленных внешних дестабилизирующих факторов: погодных условий, освещенности, изгиба пути, дальности до препятствия, его размера, скорости и направления движения [6]. Следовательно, требуется на основе реальных данных о дорожно-транспортных происшествиях выявить закономерности возникновения опасных ситуаций, построить матрицы рисков и вычислить требуемую вероятность идентификации различных групп препятствий.

Материалы и методика исследования. Исходными данными послужила официальная статистика дорожно-транспортных происшествий с участием трамвайных вагонов Санкт-Петербурга за период с января 2022 по июнь 2025 года (всего зафиксировано 3273 случая). По характеру событий они разделены на три категории: столкновения с подвижными объектами (2631 случай), наезды на статические препятствия (12 случаев) и падения пассажиров (630 случаев). Для каждой категории построена матрица риска, отражающая комбинации условий происшествия: зона появления объекта относительно вагона, траектория движения объекта, причина инцидента, а также внешние факторы (день недели, время суток, уровень освещенности, изгиб пути) [5, 7].

Для уточнения типов объектов проанализированы видеозаписи с камер пяти наиболее сложных маршрутов, охватывающих перекрестки, прямые участки и кривые малого радиуса. Всего выявлено 3599 препятствий, сгруппированных по объединенным категориям (взрослый человек, подросток, ребенок, легковой автомобиль, грузовой транспорт и др.). Ключевым параметром стала средняя относительная скорость сближения (СОСС) , рассчитанная отдельно для каждого типа траектории (параллельная, встречная, перпендикулярная, средняя угловая) на основе стандартных кинематических формул [6]. Внешние условия нормированы по шкале от 1 (идеальные) до 0 (критически плохие), что позволило включить их в единую числовую модель.

Результаты и их анализ. Распределение частот показало доминирование людей: взрослые (30,18 %), подростки (21,37 %) и дети (18,31 %), что в сумме дает около 69,5 % всех зафиксированных объектов. Легковые автомобили встречаются в 19,06 % случаев, грузовой транспорт – в 5,50 %. Таким образом, для обеспечения безопасности критически важно, чтобы система ИИ уверенно распознавала именно пешеходов и автомобили.

Анализ матриц столкновений выявил концентрацию рисков во фронтальной полусфере, особенно в правом переднем секторе и правой «слепой» зоне [5, 7]. В диапазоне 50–81 % столкновений происходят по вине водителей автомобилей; пик аварийности приходится на будние дни. Дневные часы дают большее число инцидентов, однако около четверти всех ДТП случаются в темное время суток, а сумерки добавляют сложности, связанные с бликами и сниженной контрастностью.

Отдельного внимания заслуживают наезды на статические препятствия (всего 12 случаев за три с половиной года). Их анализ показал характерные особенности: 100 % наездов произошли во фронтальном секторе, причем более 83 % – на прямых участках при прямолинейном движении. Это объясняется эффектом привыкания – водитель ожидает свободную колею. Отчетливо выражена сезонность – половина инцидентов пришлась на март и ноябрь, когда мокрая листва, снег и гололед одновременно увеличивают число предметов на пути и снижают их видимость [2].

На основе полученных данных была вычислена требуемая вероятность идентификации по формуле

$$P = 1 - \frac{N_{\text{ДТП}}}{N_{\text{преп}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ДТП}}$ – количество ДТП, происходящих при заданных внешних условиях в среднем в течение года; $N_{\text{преп}}$ – ожидаемое количество препятствий, которые появляются перед трамвайным вагоном в течение года.

Расчеты показали, что наибольшие значения достигаются в условиях низкой освещенности и осадков, особенно для автомобилей – показатель превышает 0,95. Эти количественные ориентиры служат целевыми показателями при проектировании и сертификации систем ИИ [3,7].

Для систематизации факторов предложен куб рисков, по осям которого отложены габаритный размеры препятствия, СОСС и нормированное значение внешних условий (всего 567 ячеек). Такая визуализация позволяет наглядно выделить критические области тестирования. Например, сочетание малых габаритов, высокой скорости и плохой видимости [3].

Обсуждение и практические рекомендации. Полученные результаты определяют приоритеты для разработки методик испытаний. Сценарии должны приоритизировать фронтальную полусферу, в особенности, правый передний сектор [7]. Алгоритмы ИИ должны прогнозировать траекторию объекта, особенно при пересекающих справа объектах, используя предсказывающий трекинг с оценкой намерений водителя. Натурные испытания необходимо проводить на прямых участках, кривых и перекрестках, включая маневры левого и правого поворота [8]. Обязательно тестирование в сумерках и осадках с использованием многомодальных сенсоров (видеокамера плюс лидар/радар), так как комбинирование источников данных повышает дальность обнаружения и устойчивость к помехам [6, 9].

Помимо натурных экспериментов необходимо развитие виртуальных полигонов для генерации редких граничных сценариев (внезапное появление животного, падение крупного предмета), которые статистически незначимы, но несут высокий риск [7]. Предложенный куб рисков может стать концептуальной основой для задания критериев таких тестовых испытаний.

Следует отметить отсутствие в настоящее время единых нормативных требований к процедурам верификации алгоритмов ИИ на транспорте [10]. Разработанная трехмерная модель и количественные оценки вероятности могут быть использованы при формировании отраслевых стандартов. Методы функциональной безопасности позволяют связать вероятностные показатели с конкретными архитектурными решениями (резервирование, разнообразие сенсоров) [5].

Заключение. Проведенное исследование установило, что основными препятствиями являются люди (около 69,5 %) и автомобили (около 25 %). Построенные матрицы рисков выявили критическую зону – фронтальную полусферу и правый передний сектор. Расчет требуемой вероятности идентификации показал, что в условиях пониженной видимости для автомобилей она должна превышать 0,95. Предложенный куб рисков служит базой для создания комплексных методик испытаний. Дальнейшие работы предполагают уточнение целевых значений на основе экономической оценки ущерба.

Список литературы

1 **Tamascelli, N.** Artificial Intelligence for safety and reliability: A descriptive, bibliometric and interpretative review on machine learning / N. Tamascelli, A. Campari, T. Parhizkar, N. Paltrinieri // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2024. – Vol. 90, Art. № 105343. – DOI: 10.1016/j.jlp.2024.105343.

2 **Kim, J. Y.** Uncovering reliability blind spots in transportation AI: an edge-case-based validation approach for transportation systems / J. Y. Kim, D. Lee // Scientific Reports. – 2026. – DOI: 10.1038/s41598-026-62679-w.

3 **Сапожников, Вл. В.** Синтез систем управления движением поездов на железнодорожных станциях с исключением опасных отказов / Вл. В. Сапожников. – М. : Наука, 2021. – 229 с. – ISBN 978-5-02-040987-5.

4 **Шубинский, И. Б.** Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза / И. Б. Шубинский. – М. : Надежность, 2016. – 544 с. – ISBN 978-5-7572-0399-7.

5 **Мыськив, И. И.** Методы оценки и верификации функциональной безопасности системы восприятия беспилотных железнодорожных транспортных средств / И. И. Мыськив, И. Ю. Попов, Д. А. Заколдаев // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер.: Естественные и технические науки. – 2025. – № 3. – С. 96–100. – DOI: 10.37882/2223-2966.2025.03.33.

6 Adaptive Cruise Control Systems for Autonomous Tram Vehicle / J. Baek, J. Kwak, H. Hwang [et al.] // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 181787–181798. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3509866.

7 Testing autonomous vehicles and AI: perspectives and challenges from cybersecurity, transparency, robustness and fairness / D. Fernández Llorca, R. Hamon, H. Junklewitz [et al.] // European Transport Research Review. – 2025. – Vol. 17, is. 1. – DOI: 10.1186/S12544-025-00732-X.

8 **Поспелов, Д. А.** Ситуационное управление: Теория и практика / Д. А. Поспелов. – 2-е изд. – М. : ЛЕНАНД, 2021. – 288 с. – ISBN 978-5-9710-8046-6.

9 Experimental Study Regarding Long Range LiDAR Capabilities in Sensing Safety Distance for Vehicle Application / G. Popa, M.-A. Gheți, E. Tudor [et al.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22, № 15. – P. 5731. – DOI: 10.3390/s22155731.

10 **Сорокин, А. Е.** Обзор проблем нормативного регулирования требований к проведению испытаний алгоритмов систем искусственного интеллекта на транспорте / А. Е. Сорокин // Современные подходы в системном инжиниринге и цифровом моделировании сложных производственных систем : сб. науч. тр. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 656.225:656.08

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА ПРИ НАЗНАЧЕНИИ ЛОКОМОТИВОВ ГРУЗОВОГО ДВИЖЕНИЯ

А. А. СТРАДОМСКАЯ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Назначение локомотивов на поезда традиционно оценивается показателями эффективности работы локомотивного парка (простой, пробег, размер эксплуатируемого парка). Вместе с тем каждое решение по увязке локомотивов является и решением в области безопасности перевозочного процесса. Так, назначение локомотива, сила тяги которого не соответствует массе состава, создает риск остановки поезда на расчетном подъеме; использование локомотива сверх установленного пробега до планового технического обслуживания (ТО) повышает вероятность его отказа в пути; стыковка «впритык», без запаса времени на смену бригад и экипировку, приводит к каскадному распространению задержек и вынуждает персонал работать в условиях дефицита времени, когда возрастает вероятность ошибочных действий.

На Белорусской железной дороге увязка локомотивов выполняется диспетчером преимущественно по правилу «первый прибыл – первый убыл» с использованием АРМ «Увязка локомотивов» [1]. При применении этого правила решение принимается по текущему состоянию без горизонта планирования и без оценки последствий для последующих ниток графика, а соблюдение различных ограничений обеспечивается вниманием и опытом диспетчера. В нештатных ситуациях (при дефиците локомотивов, отказе локомотива, нарушении графика) нагрузка на диспетчера резко возрастает, и человеческий фактор становится одновременно источником нерациональных назначений и последним барьером против технологически недопустимых [2].

В предлагаемой модели оперативного назначения локомотивов, в отличие от моделей тактического уровня [3], требования безопасности заложены в структуру допустимого пространства решений, а не проверяются после его формирования. Техническая совместимость задается *матрицей* $K = \|k_{li}\|$, где $k_{li} = 1$, если локомотив l по роду тяги, серии, силе тяги и остаточному ресурсу до ТО может быть назначен на поезд i на данном участке. Назначение x_{li} допустимо при выполнении условия

$$x_{li} \le k_{li}, \quad \forall\, l \in L,\ i \in N, \tag{1}$$

дополненного ограничениями по силе тяги, ресурсу по пробегу и времени работы до планового ТО и непрерывности оборота локомотива:

$$t_i^{\text{приб}} + t_s^{\text{техн}} \le t_k^{\text{отпр}}, \tag{2}$$

где $t_i^{\text{приб}}$ – время прибытия локомотива с поездом i; $t_s^{\text{техн}}$ – норма времени на технологические

операции на станции s (смена бригад, экипировка, ТО-2); $t_k^{\text{отпр}}$ – время отправления следующего поезда k (при несовпадении станций – с учетом времени пересылки локомотива резервом).

Качество вариантов назначения локомотивов оценивается параметрами многоцелевой функции

$$F = (F_{\text{прост}}, F_{\text{порож}}, F_{\text{ож}}, F_{\text{рес}}) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $F_{\text{прост}}$ – простой локомотивов в ожидании работы; $F_{\text{порож}}$ – резервный пробег; $F_{\text{ож}}$ – взаимное ожидание поездов и локомотивов; $F_{\text{рес}}$ – число используемых локомотивов. Для выбора рекомендуемого варианта применяется обобщенная стоимостная оценка

$$E^* = E_{\text{вар}} + P_{\text{вар}}, \quad (4)$$

где $E_{\text{вар}}$ – эксплуатационные расходы варианта; $P_{\text{вар}}$ – штрафная составляющая варианта, компоненты которой сгруппированы по их роли в обеспечении безопасности (таблица 1).

Таблица 1 – **Группы штрафной составляющей и их назначение**

Группа штрафов	Назначение группы штрафов	Штрафные составляющие
Основные	Штрафы, обеспечивающие допустимость решения	Штраф за неназначенные поезда $P_{\text{неназн}}$. Штраф за нарушение тягово-весовых норм $P_{\text{наруш.тяги}}$
Операционные	Штрафы, обеспечивающие надежность графика движения поездов	Штраф за нарушение временных окон отправления $P_{\text{наруш.отпр}}$. штраф за «хрупкость» временного окна $P_{\text{надеж}}$
Дополнительные	Штрафы, направленные на долгосрочную экономию	Штраф за превышение использования ресурса локомотива $P_{\text{перераб}}$. Штраф за несбалансированность парка $P_{\text{бал}}$. Штраф за наличие резервного пробега локомотивов $P_{\text{рез}}$. Штраф за использование избыточной мощности локомотива $P_{\text{изб мощ}}$

Для решения задачи разработан многокритериальный генетический алгоритм на основании алгоритма NSGA-II [4] с недоминируемой сортировкой, расстоянием скученности и элитарным отбором. Хромосома в алгоритме представляет собой вектор назначений локомотивов поездам.

Отличительным элементом метода с точки зрения безопасности являются корректирующие операторы, применяемые в строгой последовательности после скрещивания и мутации: О1 – технической совместимости (замена недопустимого назначения совместимым локомотивом с минимальным резервным пробегом); О2 – устранения временных конфликтов и дублирования локомотивов; О3 – технического обслуживания (направление локомотива с исчерпанным ресурсом на ТО и передача его поездов локомотивам с достаточным остаточным ресурсом); О4 – корректировки стыковок (открепление невыполнимого назначения и локальный поиск свободного локомотива в узле). Решения, которые не удается исправить с помощью корректирующих операторов, получают штрафные значения по всем критериям и располагаются в конце ранжирования. Таким образом, все варианты, предлагаемые диспетчеру, технологически допустимы по построению, а контроль ограничений переносится из зоны внимания диспетчера в алгоритм. Диспетчеру выдаются 3–5 вариантов фронта Парето (с минимальным парком, с максимальным запасом времени на стыковках, с минимальным резервным пробегом), но окончательный выбор остается за ним.

Для работы в реальном времени предусмотрен «теплый старт»: при поступлении сигнала о нештатной ситуации текущий фронт Парето принимается за начальную популяцию, пересчитывается только затронутая часть варианта графика увязки локомотивов, а короткий цикл оптимизации (5–10 поколений) формирует 2–3 варианта корректировки. Технология апробирована на условном комбинированном полигоне с ответвлением. При опоздании поезда на 4 ч назначение его локомотива передано локомотиву, прибывшему ранее с другим поездом (запас времени 110 мин), а опоздавший локомотив переназначен на более поздний поезд (запас 186 мин). Сбой устранен без резервного пробега и задержек отправления. При внезапном отказе тепловоза перед отправлением его назначения из четырех поездов распределены между локомотивами с других участков: число поездов без тяги сократилось с четырех до нуля ценой одной наведенной задержки 15 мин, штрафная составляющая уменьшилась более чем на 90 %. При выводе трех локомотивов из обращения учет категорий поездов позволил сохранить обслуживание направлений с приоритетными поездами без

нарушения графика, при этом уменьшив работу на наименее загруженном участке. Ни в одном сценарии дефицит тяги не компенсировался нарушением ограничений – назначением локомотива недопустимого рода тяги или сверх ресурса до ТО.

Таким образом, формализация требований безопасности в виде матрицы совместимости, последовательности корректирующих операторов и штрафов позволяет перевести назначение локомотивов из области экспертных решений в область гарантированно допустимых вариантов, одновременно повышая устойчивость перевозочного процесса к сбоям и эффективность использования локомотивного парка. Технология ориентирована на внедрение в составе АРМ «Увязка локомотивов» и интеллектуальной системой управления перевозочным процессом [5].

Список литературы

1 **Страдомская, А. А.** Функциональные возможности автоматизированного рабочего места «Увязка локомотивов» / А. А. Страдомская // Тихомировские чтения: Инновационные технологии перевозочного процесса : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 30 нояб. 2018 г. / Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. А. А. Ерофеева. – Гомель, 2019. – С. 146–149.

2 **Некрашевич, В. И.** Управление эксплуатацией локомотивов / В. И. Некрашевич, В. И. Апатцев. – М. : МГУПС (МИИТ), 2009. – 296 с.

3 **Piu, F.** The locomotive assignment problem: a survey on optimization models / F. Piu, M. G. Speranza // International Transactions in Operational Research. – 2014. – Vol. 21, № 3. – P. 327–352.

4 A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II / K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2002. – Vol. 6, № 2. – P. 182–197.

5 **Ерофеев, А. А.** Интеллектуальная система управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте : монография / А. А. Ерофеев. – Гомель : БелГУТ, 2022. – 407 с.

УДК 656.2:519.86

ОЦЕНКА УРОВНЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ МЕТОДОМ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА

М. Ю. СТРАДОМСКИЙ, О. А. ТЕРЕЩЕНКО, А. А. НАУМЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Обеспечение безопасности движения поездов является главным условием устойчивого функционирования железнодорожного транспорта, напрямую определяющим сохранность жизней и эффективность перевозок. Несмотря на планомерную модернизацию инфраструктуры и снижение удельной аварийности на Белорусской железной дороге, сохраняется острая потребность в глубоком понимании причинно-следственных связей, являющихся источником транспортных рисков. Традиционная модель реагирования на последствия уже свершившихся инцидентов постепенно уступает место проактивным количественным методам, позволяющим воздействовать непосредственно на корневые причины нарушений.

Факторный анализ является высокоэффективным инструментом современного риск-менеджмента. Предлагаемый подход синтезирует статистические параметры и структурированные экспертные оценки, позволяя не только идентифицировать спектр угроз, но и математически измерять степень их деструктивного влияния на транспортную систему. Международный опыт, опирающийся на нормативную базу ОАО «РЖД» и рекомендации Организации сотрудничества железных дорог, подтверждает целесообразность применения этого алгоритма для оценки функциональной безопасности [1, 2].

Белорусским государственным университетом транспорта проведена комплексная научно-исследовательская работа по адаптации международных методик с учетом национальной специфики. Разработанный механизм включает систему оценки и специализированные классификаторы для различных структурных подразделений Белорусской железной дороги [3]. Репрезентативная выборка из разработанного для хозяйства перевозок классификатора угроз, отражающая интеграцию технологических и человеческих факторов, приведена в таблице 1.

Таблица 1 – **Факторы риска в хозяйстве перевозок (фрагмент разработанного классификатора)**

Фактор риска, влияющий на безопасность движения	Потенциальное влияние на функциональную систему
Нарушение технологии формирования и расформирования поездов	Высокая вероятность сходов и повреждения подвижного состава при маневрах
Прием или отправление поезда при запрещающем показании светофора	Высокий риск столкновений на станционных путях и перегонах
Движение при полностью неиспользованном маршруте	Угроза несанкционированного выезда подвижного состава на занятые участки
Нарушение норм закрепления подвижного состава	Риск самопроизвольного ухода вагонов на маршруты следования
Сверхурочная работа оперативного персонала	Снижение концентрации внимания, существенный рост вероятности ошибки
Систематический рост количества отказов технических средств	Сбои в работе, инфраструктурные ограничения пропускной способности

Для количественного измерения выявленных угроз в методике применяется балльно-рейтинговая система, базирующаяся на двух критериях: доле воздействия фактора, определяемой экспертно, и степени проявления фактора, вычисляемой на основе статистики. Оценка осуществляется по пятибалльной шкале (от 1 – незначительный уровень, до 5 – критический). Важным методологическим новшеством модели стал принципиальный отказ от использования нулевых значений. Такой подход гарантирует: даже скрытые факторы с минимальным фоновым воздействием будут учтены, что важно для предотвращения синергетического эффекта, когда наложение нескольких «незначительных» отказов приводит к тяжелым последствиям.

Комплексная значимость влияния фактора на риск S_f рассчитывается как произведение базовых показателей:

$$S_f = \alpha_f D_f,$$

где α_f – доля воздействия фактора; D_f – степень проявления фактора [4, 5].

Итоговое значение произведения (в диапазоне от 1 до 25) классифицируется по четырем уровням опасности – от состояния «неопасно» (1–4 балла) до состояния «крайне опасно» (20–25 баллов).

Внедрение предложенной методики на Белорусской железной дороге обеспечит переход к архитектуре упреждающего управления функциональной безопасностью. Обоснованная приоритизация рисков позволит руководящим работникам рационально распределять материальные ресурсы, точечно воздействуя на наиболее уязвимые звенья перевозочного процесса в условиях ограниченного финансирования, а также непрерывно отслеживать эффективность применяемых корректирующих мер.

Список литературы

1 **Веревкина, О. И.** Факторный анализ рисков безопасности движения поездов в хозяйстве автоматики и телемеханики / О. И. Веревкина, В. Э. Иванов // Наука и техника транспорта. – 2024. – № 3. – С. 107–115.

2 Об утверждении стандартов и методик анализа рисков, методов и инструментов технического аудита : распоряжение ОАО «РЖД» от 21 сент. 2011 г. № 2068р. – URL: https://base.garant.ru/70436490/ (дата обращения: 27.08.2025).

3 **Ерофеев, А. А.** Теория построения интеллектуальной системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте : автореф. дис. … д-ра техн. наук : 05.22.08 / А. А. Ерофеев; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель, 2023. – 37 с.

4 Система проведения факторного анализа в Центральной дирекции управления движением. – 2017. – URL: https://appsmakerstore.com/appsapi/kjg51ek2pgekmn/information/1243066/show.html (дата обращения: 27.08.2025).

5 **Веревкина, О. И.** О системе оценки рисков в области функциональной безопасности движения поездов / О. И. Веревкина // Мир транспорта. – 2017. – Т. 15, № 6. – С. 126–141.

УДК 539.3

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАПЛЕУДАРНОЙ ЭРОЗИИ

СУНЬ ИН, М. Д. ЯЗЫКОВ, А. В. БАБАЙЦЕВ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Проблема разрушения элементов конструкции летательного аппарата (ЛА) в процессе дождя стала известна с увеличением скоростей полета до околозвуковых и выше в отечественной авиации.

Подобные повреждения, называемые эрозией, могут привести к значительному ухудшению качества материала и сделать элементы конструкций, подверженные воздействию капель жидкости, неэффективными или даже бесполезными. Эрозионный процесс особенно актуален для оборудования и элементов конструкции, обращенных навстречу высокоскоростному потоку: лопатки двигателя, лопасти воздушного винта, остекление кабины, передние кромки крыла, антенные обтекатели.

Активное исследование процесса капельных соударений с металлической поверхностью началось только в конце 1960-х годов на первых испытательных стендах. Современное состояние развития методов численного моделирования и прикладных программных пакетов позволяет оценивать процесс износа материала как в составе инженерной модели агрегата / детали, так и на «микроуровне» непосредственно материала поверхности. В научно-инженерной среде наиболее часто применяют один из двух подходов: на базе методов вычислительной гидрогазодинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD) и конечно-элементных методов (Finite Element Analysis – FEM). Первый позволяет явно учитывать геометрию и рабочие условия рассматриваемой детали, применяя полуэмпирические, аналитические и комбинированные зависимости для оценки скорости эродирования. Методы на базе явной динамики (Explicit FEM) позволяют учесть структуру материала, оценить напряжения и деформации при каждом ударе частицы о поверхность, что преимущественно для анализа стойкости материала к продолжительному воздействию.

В рамках CFD-моделирования осуществлялось решение задачи в Лагранжевой постановке, капли воды распределены в потоке воздуха, каждая рассматривается как материальная точка, движение частиц при этом рассчитывается по второму закону Ньютона. В процессе расчета учитывается воздействие потока на частицы и частиц на поток. Скорость частиц воды варьировалась в диапазоне $V = 370…617$ м/с, исследовались углы контакта $\alpha = 0^{o}$, 15°, 30°. Основным критерием, характеризующим процесс эрозии материала, является скорость эродирования. Были получены графики распределения нормального давления и скорости эрозии по образующим образца.

В качестве заключения по полученным результатам отмечается снижение значения нормального давления, создаваемого каплями воды на поверхности исследуемого образца с увеличением угла контакта. Аналогичная зависимость наблюдается для скорости эрозии. При анализе поля скоростей эрозии по поверхности образца было обнаружено расширение соответствующего «эрозионного кольца» при увеличении угла контакта, что было подтверждено результатами экспериментальных исследований.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания МАИ (шифр FSFF-2025-0001).

Список литературы

1 **Спринжер, Дж.** Эрозия при воздействии капель жидкости / Дж. Спринжер. – М. : Машиностроение, 1981. – 200 с.

2 Эрозия / А. Эванс, А. Рафф, С. Видерхорн [и др.] ; под ред. К. Прис. – М. : Мир, 1982. – 464 с.

3 **Строкач, Е. А.** Численное моделирование процесса эродирования твердыми частицами в газовом потоке (обзор) / Е. А. Строкач, Г. Д. Кожевников, А. А. Пожидаев // Вестник ПНИПУ. – 2021. – № 67. – С. 56–69.

4 Исследования в области каплеударной эрозии энергетического оборудования: ретроспективный обзор и анализ текущего состояния / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков, И. С. Морозкин, И. Ю. Забияка // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – № 1 (84). – С. 67–76.

5 **Скотникова, М. А.** Оценка опасности каплеударной эрозии методами теории упругих деформаций / М. А. Скотникова, В. В. Елисеев, А. А. Москалец // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 1 (2). – С. 296–299.

УДК 656.13

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Е. Ю. УДАВЦОВА, А. А. КОНДАШОВ, Е. В. БОБРИНЕВ
ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха

Безопасность дорожного движения является важной задачей реализации политики в области охраны жизни и здоровья населения, а также одной из важных социально-экономических и демографических задач Российской Федерации. Полный и всесторонний анализ данных о дорожно-транспортных происшествиях (далее – ДТП) имеет важное значение как основа для выработки ре-

шений в области обеспечения безопасности дорожного движения, в том числе по совершенствованию его организации. Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения в Российской Федерации с 2015 по 2024 г. приведены на сайте ГИБДД [1].

В таблице 1 приведена динамика количества ДТП и их последствий по рассматриваемым годам наблюдений.

Таблица 1 – **Динамика дорожно-транспортных происшествий и их последствий в Российской Федерации за 2015–2025 годы**

Год	Количество ДТП	Погибло людей	Травмировано людей
2015	184000	23114	231197
2016	173694	20308	221140
2017	169432	19088	215374
2018	168099	18214	214853
2019	164358	16981	210877
2020	145073	16152	183040
2021	133331	14874	167856
2022	126705	14172	159635
2023	132466	14504	166500
2024	132037	14403	164754
2025	128793	13943	159889

До 2022 года наблюдалось ежегодное снижение показателя «количество ДТП». За 8 лет (с 2015 по 2022 год) количество ДТП снизилось на 31 %. В 2023 году произошел рост количества ДТП на 4,5 % по сравнению с предыдущим годом. В 2024 году количество ДТП практически не уменьшилось по сравнению с предыдущим годом. В 2025 году наметилась тенденция к снижению ДТП на 2,5 %. Также наблюдается ежегодное снижение показателя «погибло людей» до 2022 года. С 2015 по 2022 год количество погибших людей в ДТП снизилось на 39 %. В 2023 году произошел рост погибших людей в ДТП на 2,3 % по сравнению с предыдущим годом. В 2024 году количество числа погибших людей в ДТП практически не уменьшилось по сравнению с предыдущим годом. В 2025 году наметилась тенденция к снижению гибели людей в ДТП на 3 %. Снижение по всем абсолютным показателям состояния безопасности дорожного движения не всегда свидетельствует об улучшении безопасности дорожного движения по всем параметрам [2]. Достаточно провести более углубленный анализ статистических данных, чтобы выявить другие факторы, влияющие на риски гибели людей в ДТП. На рисунке 1 приведена динамика среднего количества погибших при ДТП людей в расчете на 1 ДТП. В 2019 году рассматриваемый показатель достиг свого минимума: в среднем в 100 ДТП погибало 10,3 человека. В последующие годы их количество стало увеличиваться. На рисунке 2 приведено отношение количества погибших при ДТП людей к общему количеству пострадавших (сумме погибших и травмированных). Этот показатель оценки тяжести последствий характеризует риск гибели среди пострадавших при ДТП [3].

Данный показатель также достиг своего минимума в 2019 году: риск гибели пострадавших при ДТП составил 7,5 %. В последующие годы его величина достигла 8,2 % в 2022 году, незначительно снизившись до 8 % в 2023–2025 гг.

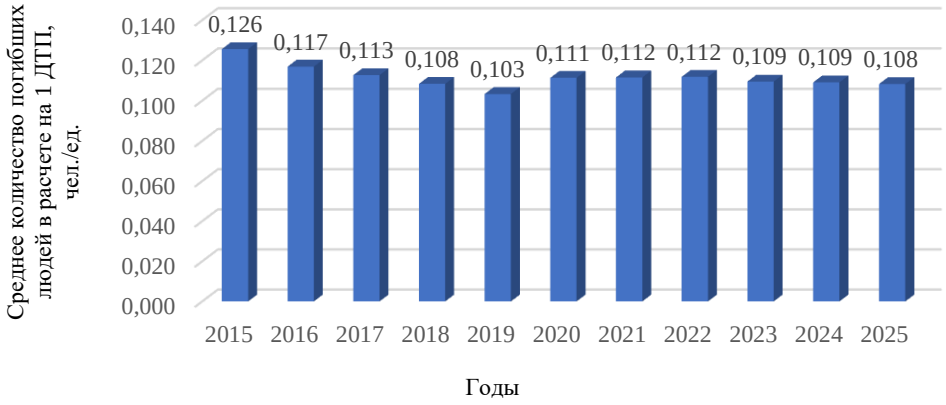


Рисунок 1 – Динамика среднего количества погибших при ДТП людей в расчете на 1 ДТП

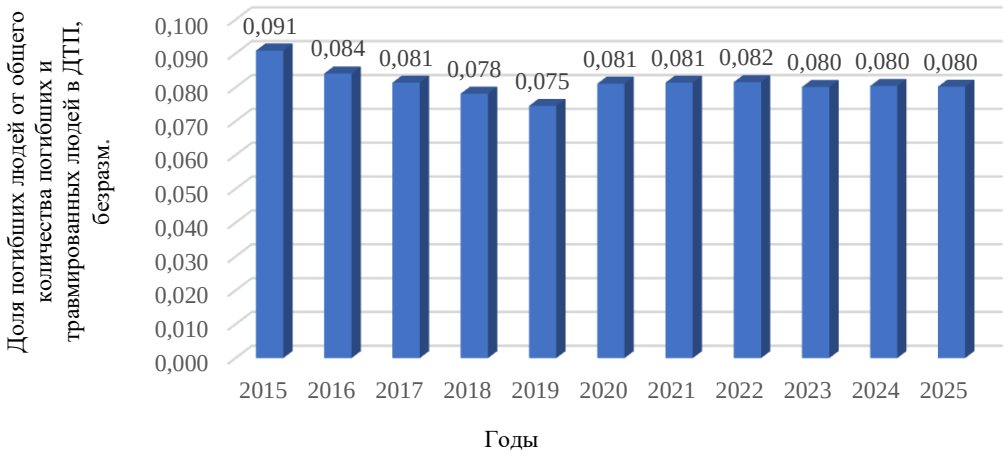


Рисунок 2 – Динамика отношения количества погибших при ДТП людей к общему количеству пострадавших

Таким образом, вопрос травматизма и гибели людей при ДТП по-прежнему является актуальным для научных исследований. Возможно, фактором, влияющим на увеличение риска гибели среди пострадавших при ДТП в 2020–2025 гг., является прекращение использования программно-целевого подхода как принципа обеспечения безопасности дорожного движения.

Список литературы

1 Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения. – URL: http://stat.gibdd.ru/ (дата обращения: 11.09.2025).

2 Повышение безопасности движения автомобилей на основе анализа аварийности и моделирования ДТП / В. А. Корчагин, С. А. Ляпин, В. Э. Клявин, В. В. Ситников // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 6–2. – С. 251–256.

3 **Сушко, А. А.** Индикаторы и критерии оценки тяжести последствий дорожно-транспортного происшествия / А. А. Сушко // Автомобиле- и тракторостроение : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2018. – С. 71–73.

УДК 656.212.4

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИЙ СТРЕЛОЧНЫХ ГОРЛОВИН

Е. А. ФИЛАТОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Вопросам качества проектирования сортировочных горловин посвящено множество работ, а в качестве критериев выбираются различные характеристики конструкции плана. Наиболее простым является расчетная длина пути по маршруту скатывания (от вершины горки до расчетной точки): чем меньше длина, тем лучше конструкция плана. Суть подхода в том, что работа части сил сопротивления движению вагона прямо пропорциональна длине маршрута. Следовательно, конструкция с меньшей длиной является более рациональной. Однако такой подход не позволяет сравнивать между собой горловины с разным количеством путей и условиями эксплуатации, большинство сопротивлений учитывается опосредованно.

Для более точной оценки качества конструкции плана горловины рассчитывается коэффициент γ. Он определяется как отношение максимальной величины работы A_{max} (по «трудному» пути) к минимальной величине A_{min} (по «легкому» пути) затрачиваемых при скатывании на отдельные пути сортировочного парка. Теоретически он может изменяться от 0 до 1, но в типовых горочных горловинах (увязанных с помощью переводов марки 1/6 симметричная) изменяется в небольших пределах $\gamma = 0{,}8…0{,}9$ [1, 2]. В реальных горловинах (построенных с переводами всех типов) может быть несколько ниже (в рассматриваемых моделях до 0,55), но также редко опускается ниже 0,8. Таким образом, рабочий диапазон коэффициента не позволяет в полной мере отразить особенности горловин, близких по конструкции, не отражает различия в расчетных условиях и является недостаточно информативным для выполнения сравнительного анализа различных горок, т. к. его величина относительная.

Для оценки эксплуатационных качеств конструкции горки лучше подходит величина работы, выполняемой вагоном на преодоление всех сил сопротивлений при скатывании с горки по трудному пути A_{max}, Дж/кН. Для сравнения различных горок (с различными расчетными климатическими условиями, параметрами бегунов, высотой горки и длинами путей) такая величина также не всегда достаточно информативна.

Дополнительно конструкции различных горок можно оценить через среднюю величину работы, приходящуюся на один метр расчетной длины путей $\overline{a} = \sum A_i / \sum L_{pi}$, Дж/кН/м. При сравнении различных путей одной горловины данный коэффициент рассчитывается как отношение работы по данному пути к его длине $a_i = A_i / L_{pi}$, Дж/кН/м.

На рисунке 1 показано сравнение показателей для различных моделей сортировочных горок (существующих ранее и типовых). Как видно из рисунка 1 информативность коэффициента качества γ недостаточно высокая. При этом величины A_{maxi} и a_i изменяются в заметных пределах, достаточно конгруэнтно. Пиковые значения в зоне моделей существующих сортировочных горок, наблюдаемые на графиках, связаны в большей степени с величиной сопротивления от среды и ветра (коэффициенты корреляции для a_i и A_{maxi} значимы и равны 0,68 и 0,77 соответственно) и в меньшей с остальными сопротивлениями (коэффициенты корреляции с другими величинами не значимы). Это объясняется в первую очередь различием расчетных условий расположения станции. Рост показателей с увеличением количества путей связан с увеличением сопротивлений от стрелочных переводов и кривых, количество которых растет пропорционально.

Величины коэффициентов в типовых конструкциях демонстрируют меньшую информативность за счет двух факторов: расчет проводился при одинаковых климатических условиях, а конструкции горловин конгруэнтны между собой. Сравнительные коэффициенты по отдельным путям в рамках одной горловины, как правило, не имеют большой разницы. Так, показанные параметры, в симметричной горловине на 42 сортировочных пути изменяются в пределах: a_i = 5,5…6,5 Дж/кН/м, A_i = 2,5…3,5 Дж/кН; γ = 0,87…0,98.

На рисунке 2 показано сравнение величин A_i и a_i для отдельных путей горочной горловины на 17 путей. Как видно из рисунка 2 экстремумы графиков не совпадают: максимальная величина работы A_i наблюдается по пути № 17, а максимальная величина удельной работы, приходящаяся на 1 м пути a_i, наблюдается по пути № 2; минимальная величина A_i наблюдается по пути № 10, а минимальная величина a_i наблюдается по пути № 13. Это говорит о неравномерности распределения сопротивлений на участках разных путей, что следует учитывать при проектировании продольного профиля горки путем выделения зон концентрации работы на преодоление сопротивлений и установление там возможно большего допустимого уклона. Высокое значение величины a_i может указывать на компактность конструкции горловин, а низкое значение при соизмеримых условиях на избыточную длину.

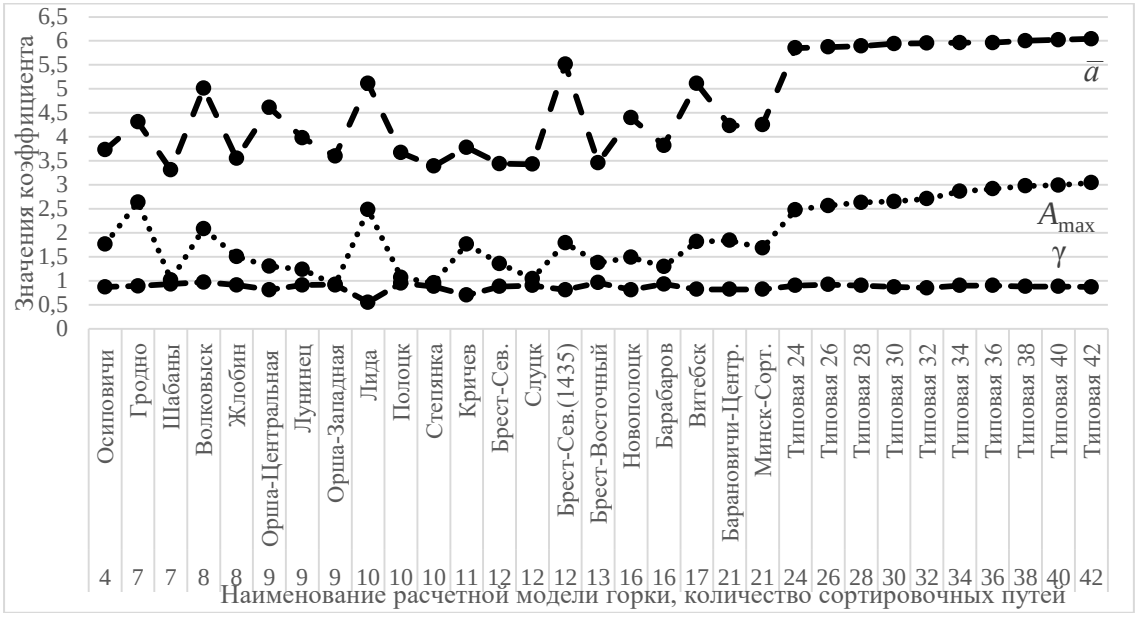


Рисунок 1 – Сравнение качественных показателей стрелочных горловин различных конструкций

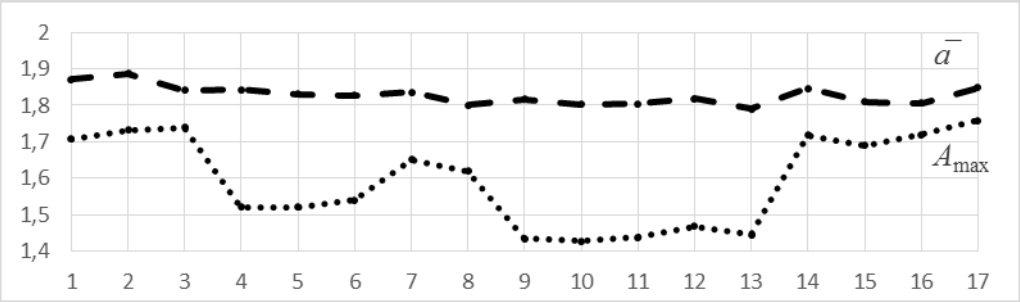


Рисунок 2 – Сравнение качественных показателей стрелочной горловины из 17 путей (величина a_i уменьшена в 2,7 раза для удобства сравнения значений)

Исследуемые показатели позволяют также достаточно объективно оценивать энергетическую эффективность сложившихся параметров сортировочной горки, т. к. от величины работы зависит высота горки и мощность тормозных позиций. Основные эксплуатационные затраты на маневровую работу локомотива по надвигу и роспуску также пропорциональны высоте горки. Высота в свою очередь соответствует работе по преодолению сил сопротивления. Поэтому сравнение горок по указанным критериям позволяет косвенно сравнивать их экономическую эффективность. Так, принятые расчетные модели горок Гродно, Витебск, Брест-Северный (1435), Лида и Волковыск (см. рисунок 1) энергетически более затратны, что следует учитывать при выборе опорных станций для сортировочной работы на анализируемом полигоне.

Список литературы

1 Проектирование сортировочных станций с автоматизированными горочными комплексами : учеб.-метод. пособие для курсового и дипломного проектирования по дисциплине «Железнодорожные станции и узлы» / В. Я. Негрей, В. А. Подкопаев, С. А. Пожидаев [и др.] ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 235 с.

2 Железнодорожные станции и узлы (задачи, примеры, расчеты) : учеб. пособие / В. Я. Негрей, В. А. Подкопаев, С. А. Пожидаев [и др.] ; под ред. В. Я. Негрея; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2018. – 625 с.

УДК 656.086.1

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ

К. М. ШКУРИН
Белорусская железная дорога, г. Минск

М. И. ШКУРИН
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Несмотря на то, что в последние десятилетия внедрение современных технических систем в организации железнодорожных перевозок обеспечивало постепенное снижение количества нарушений безопасности движения (в том числе нарушений с человеческими жертвами), к настоящему времени многие государства с развитыми железнодорожными сетями столкнулись со стагнацией в выполнении показателей безопасности. Так, в отчете Европейского железнодорожного агентства о безопасности и взаимодействии [1] отмечено, что общий экономический ущерб от нарушений безопасности движения на железнодорожном транспорте в государствах Европейского союза в 2024 году составил порядка 3,4 млрд евро; при этом за период с 2020 года не было достигнуто существенного улучшения уровня безопасности, а отдельные показатели (например, количество случаев травмирования) даже ухудшились в сравнении с 2020 годом.

К настоящему времени высокая степень взаимозависимости многочисленных элементов в таких сложных технологических системах, как транспортный комплекс, привела к тому, что простое повышение надежности отдельных элементов системы (например, использование более долговечных

деталей, развитие методов подготовки персонала и т. д.) оказываются недостаточными для обеспечения дальнейшего повышения уровня безопасности. Отсутствие заметного прогресса в обеспечении безопасности движения указывает на необходимость совершенствования концептуальных подходов к управлению безопасностью в транспортных системах.

Концептуально различные подходы к управлению включают в себя различные методы, цели и функции управленческой деятельности. Среди наиболее популярных подходов можно выделить процессный, ситуационный и системный подходы. В работе [2] рассмотрено влияние процессного и ситуационного подходов к управлению на транспорте на безопасность перевозочного процесса. В настоящей работе более широко рассматривается применение системного подхода к управлению.

Недостаток процессного и ситуационного подходов к управлению безопасностью состоит в том, что их реализация основана в большей степени на реагировании на сложившуюся ситуацию, а не на ее предотвращении. В случае, если происходит нарушение безопасности движения, процессный подход, как правило, предусматривает поиск того процесса (элемента процесса), который не был реализован должным образом, и при необходимости, внесение доработок в действующую технологию; ситуационный подход направлен на выработку рекомендаций по действиям при последующем повторении сочетания обстоятельств, вызвавших нарушение в данном конкретном случае.

Напротив, системный подход по сути своей является проактивным и ориентирован на выявление слабых мест в архитектуре технологической системы еще до того, как произошло нарушение.

Любая система представляет собой совокупность взаимосвязанных элементов, которая образует определенную целостность и обладает свойствами, не сводимыми к сумме свойств отдельных элементов (эмерджентностью) [3].

Такую сложную организацию, как транспортный комплекс, с точки зрения теории систем характеризуют следующие особенности:

– многообразие структуры, которое выражается в большом количестве разнообразных подразделений организации;

– множественность связей между элементами организации (передача материалов и информации между различными подразделениями, техническое обслуживание выполняемых процессов);

– динамичность, выражающаяся в постоянной смене состояний системы: в цикличности технологических процессов, изменениях структуры и связей отдельных элементов, множественности внешних и внутренних воздействий;

– вероятностный характер выполняемых процессов.

Системный подход подразумевает, что любое изменение условий функционирования конкретного элемента системы может повлиять на работу системы в целом. Таким образом, применение данного подхода обеспечивает снижение риска возникновения ситуации, когда решение, благоприятное для одного из элементов системы, косвенно влияет на другие элементы и в результате ухудшает показатели работы системы в целом.

Ключевой особенностью реализации системного подхода к обеспечению безопасности является использование принципа целостности, в соответствии с которым безопасность рассматривается как свойство системы в целом и не может сводиться к обеспечению бесперебойной работы каждого из элементов системы.

Более того, системный подход к безопасности предусматривает принципиальное разделение понятий надежности и безопасности. С точки зрения системного подхода, надежность системы указывает на то, что ее отдельные элементы способны качественно выполнять заданные функции, тогда как безопасность – свойство, которое существует только в рамках всей системы и достигается за счет организации эффективного управления работой элементов. Безопасность как свойство отдельного элемента системы не может рассматриваться с точки зрения системного подхода, т. к. невозможно оценить «безопасность» конкретной детали механизма, не рассматривая обстоятельства, в которых функционирует эта деталь.

Иными словами, система может быть надежной, но небезопасной, а в некоторых случаях повышение надежности отдельного элемента может отрицательно повлиять на безопасность системы в целом. Например, внедрение новых систем автоматизации, повышая надежность работы отдельных элементов транспортного комплекса, может привести к тому, что в критической ситуации (при выходе из строя автоматизированных систем) готовность персонала к оперативному реагированию на возникшие обстоятельства снизится, что в конечном счете приведет к более тяжелым последствиям от допущенного нарушения.

В классическом виде реализация системного подхода в управлении безопасностью находит выражение в построении деревьев отказов, которые позволяют заблаговременно смоделировать возможную последовательность событий, способную вызвать нарушение безопасности, и на основе ее анализа разработать управляющие воздействия, способные минимизировать риск нарушения. В относительно простых технологических системах деревья отказов позволяют эффективно иллюстрировать причинно-следственные связи между отдельными событиями, которые в совокупности приводят к нарушению [4].

К сожалению, при усложнении рассматриваемой технологической системы деревья отказов становятся менее применимыми, так как взаимодействие множества подсистем тяжело поддается формализации. Это вызвало необходимость выработки новых методов реализации системного подхода, позволяющих отразить нелинейные связи между возрастающим числом элементов сложных систем.

Одним из наиболее перспективных путей реализации системного подхода в управлении безопасностью в настоящее время является использование системно-теоретической модели аварий и процессов (Systems Theoretic Accident Model and Processes, далее – STAMP), предложенной в 2011 году американской исследовательницей Нэнси Левисон [5].

Модель STAMP принципиально отличается от классических подходов к обеспечению безопасности тем, что рассматривает в качестве одной из важнейших причин нарушения безопасности не отказы в работе элементов системы, а некорректное взаимодействие между ними. Некорректность взаимодействия может выражаться, например, в неполноте обратной связи между элементами, которая вызывает расхождение в представлениях о складывающейся ситуации у работников, находящихся на разных уровнях принятия решений, или недостаточности средств контроля за ситуацией у персонала, принимающего решения.

Применение модели STAMP подразумевает использование методики системно-теоретического процессного анализа безопасности, которую вкратце можно описать следующим образом:

– осуществляется определение целей анализа, для чего устанавливаются границы изучаемой системы, формулируются потери, которых необходимо избежать (например, травмирование людей, финансовые затраты или простои в работе транспорта), и определяются возможные состояния, способные привести к таким потерям;

– выстраивается модель изучаемой системы с определением функциональных отношений между контролерами и исполнителями, установлением возможных управляющих воздействий и обратных связей между элементами;

– для каждого работника, осуществляющего управление элементами системы, анализируются ситуации, в которых управляющие воздействия может привести к потерям для системы в целом;

– устанавливается, почему могут возникать такие неблагоприятные управляющие воздействия (недостаточность или некорректность обратной связи, наличие неучтенных взаимодействий между элементами и т. д.) и вырабатывается стратегия совершенствования рассматриваемой системы для снижения риска возникновения смоделированной ситуации.

Таким образом, STAMP позволяет ответить не столько на вопрос о том, какой элемент системы сработал неверно, сколько на вопрос о том, почему система была выстроена таким образом, что допускает нарушение безопасности, и как можно ее изменить, предотвратив такие нарушения.

Примечательно, что модель STAMP нашла наиболее широкое применение именно в управлении безопасностью на транспорте (в первую очередь – на воздушном и железнодорожном), поскольку по мере усложнения транспортных систем традиционные методы анализа безопасности начали утрачивать эффективность.

Следует отметить, что реализация системного подхода (в том числе на базе модели STAMP) в крупномасштабных системах является весьма сложной на практике, вследствие чего до настоящего времени данный подход применяется в достаточно ограниченных масштабах. Вместе с тем полагаем, что стремительное распространение больших языковых моделей (LLM) в последние годы может стать фактором, который позволит расширить область применения STAMP за счет упрощения процессов построения моделей сложных транспортных систем на базе автоматизации обработки больших объемов данных о структуре и работе транспортной организации. В этом случае изменение концептуального подхода к безопасности сможет придать новый импульс развитию методов управления безопасностью перевозочного процесса.

Список литературы

1 Report on Railway Safety and Interoperability in the EU 2026 / European Union Agency for Railways. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2026. – 121 p.

2 **Шкурин, К. М.** Современные подходы к управлению на транспорте как фактор повышения безопасности перевозочного процесса / К. М. Шкурин, М. И. Шкурин // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. пятилетке качества (Гомель, 20–21 ноября 2025 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Н. Н. Казакова. – Гомель, 2025. – С. 54–56.

3 **Карташев, В. А.** Система систем. Очерки общей теории и методологии / В. А. Карташев. – М. : Прогресс-академия, 1995. – 416 с.

4 **Киван, М.** Гибридная методика поддержки принятия решений для управления рисками в сложных социотехнических системах / М. Киван, Д. В. Березкин, Е. В. Смирнова // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2023. – № 2 (143). – С. 90–110.

5 **Leveson, N. G.** Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety / N. G. Leveson. – Cambridge, Mass.: The MIT Press, 2011. – 534 p.

2 БЕЗОПАСНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

К 80-летию со дня рождения В. И. Сенько

ВЕНИАМИН ИВАНОВИЧ СЕНЬКО: УЧЕНЫЙ, ПЕДАГОГ, СОЗИДАТЕЛЬ

Есть люди, чья судьба неразрывно связана с историей университета. Таким был Вениамин Иванович Сенько – почетный ректор БелГУТа, почетный гражданин Гомеля, заслуженный работник образования Республики Беларусь, доктор технических наук, профессор. Пройдя путь от студента механического факультета до ректора, он пятнадцать лет возглавлял университет, объединяя научную работу и подготовку специалистов с решением перспективных задач железнодорожного транспорта.

Наукой Вениамин Иванович увлекся в студенческие годы под руководством заведующего кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» профессора Н. З. Криворучко – будущего научного руководителя его кандидатской диссертации. В 1988–2001 годах Вениамин Иванович возглавлял механический факультет. В 1990 году защитил в МИИТе докторскую диссертацию, в 1992 году ему было присвоено ученое звание профессора. Развивая идеи своего учителя, В. И. Сенько сформировал новое научное направление – прогнозирование развития вагонного хозяйства железных дорог – и основал научную школу прогнозирования систем технического обслуживания, проектирования, испытаний и ремонта железнодорожного подвижного состава.

После распада СССР одной из важнейших задач транспорта Беларуси стала оценка остаточного ресурса вагонов и продление срока их службы. Для ее решения в 1997 году совместным распоряжением Белорусской железной дороги и БелГУТа была создана отраслевая научно-исследовательская лаборатория «Технические и технологические оценки ресурса единиц подвижного состава». Ее научным руководителем стал В. И. Сенько. Коллектив занимался повышением надежности и долговечности подвижного состава, техническим диагностированием вагонов и определением их остаточного ресурса.

Исследования получили практическое применение на Белорусской железной дороге. Было обосновано продление срока службы литых деталей тележек типа 18-100 грузовых вагонов, что позволило сократить потребность в закупке новых импортных деталей. На Гомельском и Минском вагоноремонтных заводах реализовали разработанный лабораторией проект «Белорусский пассажирский вагон». За эту работу авторский коллектив награжден медалью лауреата Всероссийского выставочного центра в Москве.

Важным направлением работы стало развитие в Беларуси системы оценки соответствия железнодорожной продукции требованиям безопасности. В БелГУТе был создан Орган по сертификации железнодорожной продукции и услуг, впоследствии включенный в Реестр признанных Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества и в единый реестр органов по сертификации и испытательных лабораторий ЕАЭС. Это расширило возможности проведения работ по оценке соответствия железнодорожной продукции в Беларуси.

Следующим шагом стало развитие собственной испытательной базы для проведения сертификационных испытаний. По инициативе Вениамина Ивановича в 2011 году приказом ректора был создан Испытательный центр железнодорожного транспорта «СЕКО». В 2012 году центр получил аттестат аккредитации Федеральной службы по аккредитации Российской Федерации, в 2013 году – аккредитацию Российского морского регистра судоходства. Позднее центр вошел в Единый реестр органов по сертификации и испытательных лабораторий Таможенного союза.

Созданная инфраструктура стала практическим воплощением идеи В. И. Сенько о «золотом треугольнике» – единстве образования, науки и производства: студенты и аспиранты вместе с опытными исследователями решали производственные задачи, научные разработки проходили испытания, а будущие специалисты учились мыслить системно и работать на опережение.

Научное наследие профессора – более 400 работ, в том числе 6 монографий, 15 учебников и учебных пособий, а также 45 патентов на изобретения. Под его руководством подготовлены два доктора и восемь кандидатов технических наук. Международное признание его трудов отразилось в званиях почетного доктора Московского государственного университета путей сообщения, почетного профессора Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта и Государственного экономико-технологического университета транспорта в Киеве.

Вениамин Иванович ушел из жизни в 2020 году. Но созданные им подразделения обеспечивают контроль безопасности и надежности подвижного состава, осуществляют техническое сопровождение отечественного вагоностроения, участвуют в подготовке специалистов. Его дело продолжают многочисленные ученики. В этом – живая память о человеке, который умел видеть вперед, объединять людей и превращать научные идеи в нужные стране дела.

А. В. Пигунов

УДК 629.4

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ОТ КОНТАКТА КОЛЕСА С РЕЛЬСОМ НА ПРИВОД ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Е. М. АКУЛОВА
Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

Проблема шума и вибраций в приводах железнодорожного транспорта является комплексной и обусловлена множеством факторов, связанных с движением подвижного состава, особенно на высоких скоростях. Одним из главных источников их возникновения является контакт колеса с рельсом. В этой точке формируются основные динамические нагрузки и колебания, которые затем распространяются на все элементы привода, включая тяговый двигатель, редуктор и раму тележки, железнодорожный путь. Контакт «колесо – рельс» является источником шума и генератором мощных динамических воздействий, которые напрямую влияют на надежность и долговечность привода.

Вибрации и динамические нагрузки способны негативно влиять на состояние самого пути, подвижного состава и окружающих конструкций. Они могут приводить к износу элементов, снижению надежности работы оборудования. В процессе эксплуатации при взаимодействии колес с рельсами могут возникать динамические нагрузки, которые значительно превышают статические и часто приводят к соударениям. Причинами таких нагрузок являются дефекты поверхности катания, включая ползуны (лыски), образующиеся при торможении; изменение геометрической формы из-за усталостного износа; прохождение колесом зоны стыков или нарушение непрерывности поверхности катания рельсов на стрелочных переводах; из-за неровности пути. При наличии ползунов ударная перегрузка может превышать статическую в 3–8 раз [1]. При вращении колеса ползун наносит сильный удар по рельсу, что приводит к резкому скачку контактной силы, вибрациям и может вызвать усталостные разрушения деталей привода и даже выход из строя подшипников.

На динамические нагрузки, действующие на детали привода, существенно влияют качество пути и отклонения колес от формы окружности. Так, при плохом качестве путей, максимальные динамические усилия могут превысить среднюю квазистатическую осевую нагрузку в два раза при скорости v = 100 км/ч и примерно в 2,5 раза при v = 300 км/ч. Дефекты рельсов и колес также могут привести к нагрузкам, в три раза превышающим нормальную статическую нагрузку на колесо. Такие большие нагрузки всегда связаны с высокочастотной вибрацией. Одним из факторов, который следует учитывать, является нарушение круглости колес, что в основном случается на высокоскоростных поездах. Это снижает ходовую устойчивость, безопасность и удобство поездки; приводит к увеличению затрат на техническое обслуживание колес и железнодорожных путей.

Особо ощутимы для обычных поездов частоты от 50 до 150 Гц, при которых развивается отклонение формы колес от окружности 3–5-й степеней. Такое отклонение вызывает колебания величин нормальных контактных сил, что способствует местному перенапряжению элементов поезда и рельс и усиливает их износ. В целом вибрации, возникающие вследствие воздействия динамических нагрузок от поезда, вызывают вертикальное смещение основания путей, которое зависит от осевых нагрузок и скорости поезда, динамических характеристик поездов, взаимодействия между колесом и рельсом и поддержки рельс, характеристик насыпи и надземных конструкций, а также свойств грунта.

Вибрации от контакта «колесо – рельс» могут совпадать с собственными частотами элементов привода, что приводит к резкому усилению колебаний (резонансу) и ускоренному накоплению усталостных повреждений [2].

Немаловажным фактором усиления вибрации в системе «колесо – рельс» является наличие неровностей рабочей поверхности рельсов и неисправностей колес. При движении подвижного состава по прямому участку эти источники могут быть незначительными, однако в кривых малого радиуса и на подъемах они становятся причиной повышения амплитуд вибраций. При анализе

вибраций необходимо учитывать и другие ее источники, связанные со сложностью самой системы подвижного состава. К ним относятся наличие зубчатых передач, различного рода зазоры сборной конструкции, наличие изменяющегося мощного магнитного поля и др. Поведение единиц нетягового подвижного состава в кривых малого радиуса при определенных условиях может порождать набегания колесных пар на рельс, и как результат, сход состава.

Продольные силы могут вызывать автоколебания в приводе. Если сила тяги превышает предел сцепления, возникает проскальзывание, которое может переходить в самовозбуждающиеся колебания в системе «двигатель – редуктор – колесная пара», что сопровождается сильным гулом и вибрацией. Причиной возникновения автоколебаний является снижение коэффициента трения колеса по рельсу при увеличении скорости скольжения. Поперечные силы и износ создают дополнительные поперечные и крутящие нагрузки, которые также передаются на элементы привода и способствуют их износу.

Для уменьшения динамических моментов в валопроводах привода при автоколебаниях надрессорного строения предложены конструкции фрикционного и гидравлического гасителей колебаний с регулируемыми диссипативными свойствами. Для исключения возможности появления автоколебаний двигателя на подвеске предложен ряд новых конструкций подвески, обеспечивающих надежную работу при ограниченной длине подвески и существующих в эксплуатации поперечных перемещениях колесной пары относительно рамы тележки. Для ограничения скольжения колеса по рельсу предложена конструктивная схема тягового привода, интегрированного с системой предупреждения боксования [3].

В настоящее время борьба с шумом и вибрациями ведется по нескольким направлениям:

– улучшение контакта «колесо – рельс»: шлифовка рельсов и обточка колес для устранения шероховатостей и дефектов является наиболее эффективным способом снижения шума качения;

– смазка контакта «гребень колеса – боковая грань рельса» в кривых для уменьшения износа;

– применение низкошумных (упругих) колес, в которых между ободом и центром установлены вибродемпфирующие элементы. такие колеса доказали свою эффективность, снижая уровень шума в салоне на 4–5 дБ и вибрацию кузова на 7–8 дБ [4];

– использование прямозубых или шевронных передач с высоким качеством изготовления для снижения вибраций от зацепления;

– виброизоляция двигателя и редуктора от рамы тележки с помощью эластичных опор;

– подавление пульсаций крутящего момента электродвигателя с помощью усовершенствованных алгоритмов управления инвертором.

Вибрации и динамические нагрузки, возникающие в зоне контакта колеса с рельсом, оказывают существенное влияние на работу тягового привода железнодорожного подвижного состава.

Понимание этих механизмов позволит разработать комплексные меры по снижению вибраций и шума, что актуально для повышения комфорта пассажиров, снижения износа оборудования и обеспечения безопасности движения.

Список литературы

1 The impact of wheel flat on traction drive system of electric locomotives / Like Pan, Bing Lu, Caizhi Yang [et al.] // IET Electrical systems in transportation. – 2024. – Vol. 2024, is. 1. – P. 1–19.

2 **Woller, J.** Structure-borne noise excitation from the drive train of a rail vehicle / J. Woller, M. Beitelschmidt // Proceedings of the 1st international railway symposium. – Aachen. – 2017. – P. 630–646.

3 Анализ вибрации подвижного состава под действием автоколебаний во время движения в кривых малого радиуса/ С. С. Пригожаев, А. Ю. Портной, А. А. Пыхалов, А. С. Копылов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – Вып. 4. – С. 245–251.

4 **Космодамианский, А. С.** Ограничение амплитуды автоколебаний в приводе локомотива выбором конструктивных решений / А. С. Космодамианский, М. Ю. Капустин, А. В. Самотканов [и др.] // Вестник РГУПС. – 2019. – № 2. – С. 66–76.

УДК 629.4.02

ПОДХОДЫ АО «ВНИИЖТ» И DB SYSTEMTECHNIK К УЛУЧШЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЛОКОМОТИВОВ И ПУТИ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Г. Г. АНТЮХИН, А. Г. СИЛЮТА, М. А. АБДОЯН, П. В. ЧЕРНЫШЕВ, Р. М. КУНАТ
Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»), г. Москва, Российская Федерация

В настоящее время известны различные варианты и подходы к улучшению технического состояния тепловозов для сокращения эксплуатационных расходов на их содержание – с заменой дизеля (ремоторизация) и без замены дизеля (усовершенствование и модернизация). Практический интерес представляют проекты, реализованные в разные годы на железных дорогах ОАО «РЖД» и Deutsche Bahn AG (далее – DB) на тепловозах с дизелями Д49 серий 2ТЭ116 и ТЭ109 (экспортный вариант в различных модификациях в односекционном исполнении) производства ПАО «Луганскстепловоз» [1] по оптимизации эксплуатационных расходов за счет применения усовершенствованных узлов, агрегатов и систем, а также внедрения рациональной периодичности проведения технического обслуживания (ТО) и текущих ремонтов (ТР) локомотивов в эксплуатации. Предпосылками для проведения сравнительных испытаний комплектующих (предложения DB Systemtechnik и отечественные разработки) на тепловозах 2ТЭ116 ОАО «РЖД» послужили подтвержденные эксплуатационные результаты, полученные при модернизации тепловозов BR 232 (принятое обозначение тепловоза ТЭ109 в ГДР) на сети железных дорог Германии [2]:

– увеличение межремонтных пробегов тепловозов между ТО-2 – с 3 до 9 суток и до ТР-1 − с 50 до 150 тыс. км (с отменой ТР-2);

– сокращение эксплуатационных расходов на текущее содержание тепловозов на 25−28 %.

По предложению DB Systemtechnik, с учетом более 20-летнего опыта модернизации тепловозов BR 232, поставленных в ГДР с 1970 по 1982 г., для усовершенствования были выбраны системы очистки и фильтрации наддувочного воздуха и моторного масла, быстро изнашиваемые детали и узлы дизеля, элементы топливной аппаратуры, межтрубные соединения, уплотнения и др. Комплекты усовершенствованного оборудования по техническим решениям DB Systemtechnik и АО «ВНИИЖТ» были установлены на тепловозах 2ТЭ116 № 1557 и № 1542 Юго-Восточной Дирекции тяги при капитальном ремонте тепловозов на Воронежском тепловозоремонтном заводе.

По составу изготовителей комплектующего оборудования проект DB включал такие известные мировые фирмы, как «GOETZE» (Германия), «MIBA» (Австрия), «WOODWARD» (США), «FAG» (Германия), «SKF» (Швеция), «BOLL&KIRCH» (Германия), SIEMENS AG (Германия), SCHNEIDER ELECTRIC (Франция) и др.

В числе предприятий поставщиков отечественного оборудования можно отметить таких ведущих отечественных производителей, как ООО «СКБТ» (г. Пенза), ОАО «ММЗ Вперед» (г. Тейково), ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов), ОАО «Альфа Лаваль Поток» (г. Королев), ЗАО «НПО Унихимтек» (г. Климовск, МО) и др.

Комплекты оборудования включали в себя: турбокомпрессор, воздушный и масляный фильтры дизеля, водяной фильтр системы охлаждения, уплотнительный материал (прокладки), регулятор частоты вращения и мощности, подшипники привода распределительного вала, резинотехнические изделия, поршневые кольца, межтрубные соединения масляной системы и системы охлаждения и др. При внешней идентичности по функционалу и назначению оборудование из состава комплектов DB Systemtechnik и АО «ВНИИЖТ» имеют принципиальные конструктивные отличия в исполнении:

– колесо компрессора турбокомпрессора в комплекте DB Systemtechnik выполнено с радиальными лопатками, а у комплекта АО «ВНИИЖТ» – с разнонаправленным в пространстве расположением лопаток, загнутыми против вращения колеса;

– воздушный фильтр дизеля в комплекте DB Systemtechnik выполнен 3-ступенчатым с бумажными контактными фильтрами третьей ступени, а у комплекта АО «ВНИИЖТ – 2-ступенчатым с мультициклонным фильтром первой ступени и контактным фильтром из нетканого материала 2-й ступени;

– автоматический самоочищающийся масляный фильтр у комплекта DB Systemtechnik выполнен со свечевыми, а у комплекта АО «ВНИИЖТ» – с дисковыми фильтрующими элементами, увеличенной в 1,5 раза грязеемкостью;

– безасбестовые уплотнительные материалы у комплекта DB Systemtechnik производства компании «Kautasit» с чешуйчатым, а у комплекта АО «ВНИИЖТ» – марки «Графлекс» с пластинчатым графитом;

Испытания опытных тепловозов 2ТЭ116 проводились в сравнении с тепловозами контрольных групп в штатной комплектации на полигоне Юго-Восточной железной дороги в интервалах эксплуатации до ТР-2 при установленной [3] и измененной периодичности проведения ТО и ТР:

– 15/50/200 тыс. км пробега локомотива соответственно для ТО3/ТР1/ТР2 при штатной системе планово-предупредительного ремонта (ППР);

– 15/75/225 тыс. км и 15/75/300 тыс. км при измененной системе ППР.

По результатам эксплуатационных испытаний было установлено следующее.

1 Изменение системы ППР с увеличением периодичности проведения ТР-1 с 50 до 75 тыс. км не привело к ухудшению топливной экономичности опытных тепловозов в сравнении с тепловозами 2ТЭ116 выбранной контрольной группы.

2 Средневзвешенный эксплуатационный расход топлива опытных тепловозов ниже аналогичных значений расхода топлива тепловозами контрольных групп в сопоставимые периоды эксплуатации на величину от 2,0 до 6,0 % при установленной и измененной периодичности проведения ТО и ТР.

3 Применение усовершенствованного оборудования вместе с измененной периодичностью проведения ТО и ТР не привело к уменьшению эксплуатационного ресурса и повышению частоты браковок моторного масла.

Подконтрольная эксплуатация опытных тепловозов выявила несоответствие заявленных и фактических величин наработки в эксплуатации до достижения предельных значений по автоматическим масляным фильтрам и самоочищающимся воздушным фильтрам дизеля для обоих проектов усовершенствования. В числе системных многократно повторяющихся отказов и неисправностей усовершенствованного оборудования DB Systemtechnik в эксплуатации отмечены повышенные перепады давления по масляному фильтру «Boll&Kirch» и срабатывание индикаторов загрязненности по воздушным фильтрам дизеля.

Причиной несоответствия для автоматических масляных фильтров являются особенности системы очистки и фильтрации моторного масла, когда фугат (загрязнения, смываемые с фильтроэлементов) попадают обратно в картер на фазе самоочистки фильтра, что определяет необходимость установки дополнительных систем очистки (или дополнительной очистки) для удаления загрязнений. По результатам испытаний признано положительным использование в конструкции дизеля тепловоза 2ТЭ116 конструкторско-технологических решений DB Systemtechnik, не имеющих отечественных аналогов по надежности и ресурсу:

– гибких эластичных муфт «Флексмастер»;

– торцевых уплотнений водяных насосов Goetze;

– распылителей Woodward и сопловых наконечников Kelbra топливных форсунок дизеля.

Фактическая трудоемкость в обслуживании и ремонте оборудования DB соизмерима с аналогичными показателями для штатного оборудования,

Результаты сравнительных испытаний показали возможность оптимизации эксплуатационных расходов за счет установки на тепловозах усовершенствованных узлов и агрегатов и изменения межремонтных пробегов.

Список литературы

1 ОАО ХК «Луганскстепловоз». Луганские тепловозы 1956–2006 : каталог-справ. – Луганск, 2006. – 518 с.

2 **Рендлер, К.** Внедрение комплексной модернизации на тепловозах 2ТЭ116 Укрзализницы на основании опыта Немецкой железной дороги / К. Рендлер, Т. Ноак, А. Рудаков // Локомотив-информ. – 2010. – № 6. – С. 76–89.

3 О системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» № 2796/р от 30.12.2016 г. // КонсультантПлюс : справ. правовая система (дата обращения: 20.09.2026).

УДК 629.4.027.4

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ И УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ КОЛЕСА ЭЛЕКТРОПОЕЗДА STADLER FLIRT

П. М. АФАНАСЬКОВ, В. В. КОМИССАРОВ, В. В. БЕЛОГУБ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Колеса подвижного состава относятся к числу наиболее нагруженных и ответственных узлов ходовой части железнодорожного транспорта. Для изготовления колес применяется высокопрочная колесная сталь, подвергаемая горячей прокатке и ковке, что обеспечивает необходимый запас прочности и ресурс колеса в течение всего срока эксплуатации. При этом такие эксплуатационные характеристики, как твердость, стойкость к износу и сопротивление усталостному разрушению, в значительной степени зависят от химического состава стали и режима термомеханической обработки [1].

Рассматриваемые колеса предназначены для электропоездов Flirt Belarus IS (Stadler), максимальная скорость (для колесной пары) – 200 км/ч, номинальная статическая нагрузка на рельсы – 20,5 тс. Диаметр нового колеса – 870 мм. Понижение диаметра колеса позволяет сократить эксплуатационные расходы и повысить эффективность использования электропоездов без ущерба для безопасности их движения, хотя ресурс подобных колес изучен заметно меньше, чем колес стандартного диаметра, а уменьшение диаметра сопровождается некоторым ростом контактных напряжений в зоне взаимодействия с рельсом [2].

Предложенная в [3] процедура допуска колес с пониженным диаметром согласуется с общей логикой европейского и национального стандартов, регламентирующих технический допуск колес по геометрическому и механическому критериям [4, 5].

Оценка воздействия электровоза Flirt Belarus IS на путь была выполнена испытательным центром железнодорожного транспорта Белорусского государственного университета транспорта. В ходе испытаний фиксировались вертикальные и горизонтальные силы, возникающие в контакте колеса и рельса на прямом участке пути, в кривой и при прохождении стрелочного перевода, поскольку характер и величина этих сил существенно различаются в зависимости от типа участка. Для расчета возникающих в колесе напряжений использовалась конечно-элементная модель колеса (рисунок 1), построенная в среде SolidWorks.

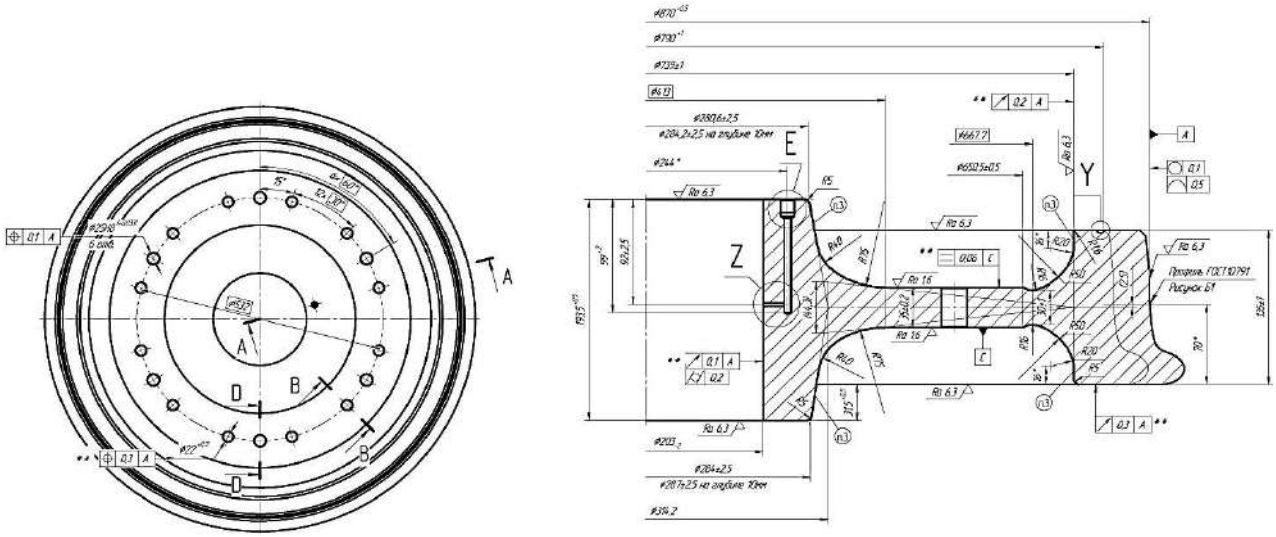


Рисунок 1 – Чертеж колеса электропоезда Flirt Belarus IS

Расчетным путем установлено, что по мере износа колеса и уменьшения диаметра обода до предельного значения 783 мм максимальные эквивалентные напряжения в диске колеса возрастают, достигая 186,5 МПа. Полученному значению соответствует коэффициент запаса статической прочности

2,14, что более чем вдвое превышает минимально допустимый уровень, принятый равным 1,0 [5]. Такой запас прочности согласуется с общим принципом нормативной оценки железнодорожных колес, согласно которому конструкция колеса должна исключать возникновение остаточных деформаций диска при действии пиковых эксплуатационных нагрузок, поскольку механический аспект оценки конструкции колеса предполагает отсутствие усталостных трещин и остаточных деформаций. Таким образом, полученный расчетный запас статической прочности свидетельствует о том, что при износе колеса до диаметра 783 мм оно сохраняет требуемый уровень статической прочности.

На основании анализа напряженно-деформированного состояния колеса были выявлены зоны с наибольшим размахом напряжений, соответствующие угловым положениям 0 и 180°. Для этих зон определены средние и амплитудные значения напряжений, а также соответствующие поправочные коэффициенты. Распределение напряжений в колесе для двух наиболее нагруженных положений представлено на рисунке 2, где также отмечен минимальный коэффициент запаса усталостной прочности, соответствующий наиболее опасной зоне диска колеса. Для диаметра 783 мм минимальное значение коэффициента запаса усталостной прочности составило 1,706, что укладывается в нормативный диапазон от 1,3 до 1,7, устанавливаемый в зависимости от стадии и глубины проведенных исследований.

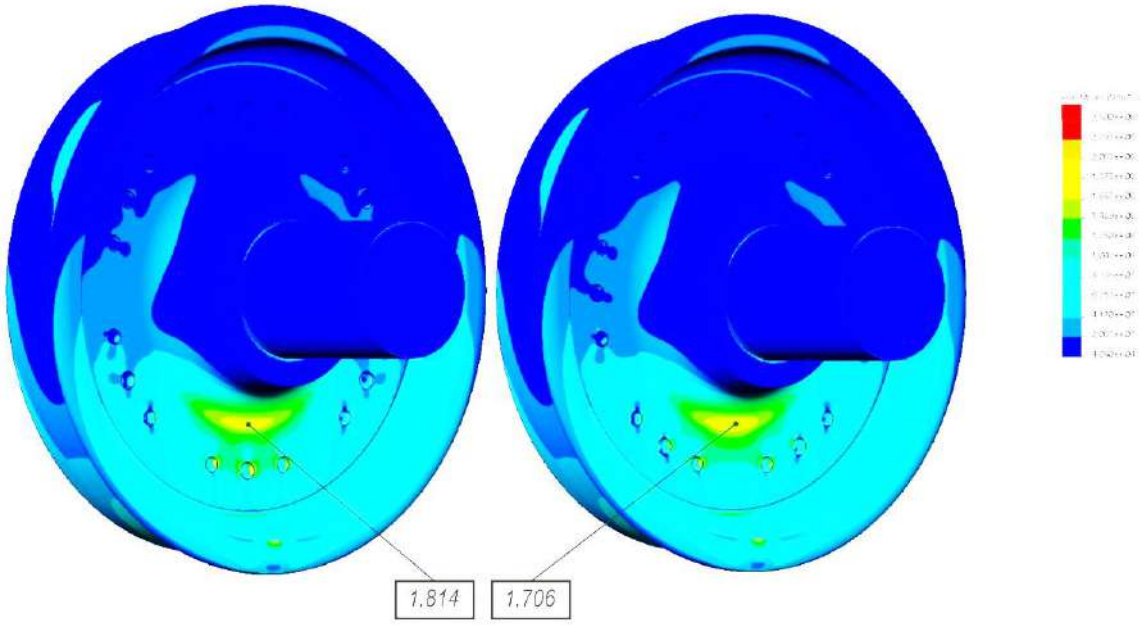


Рисунок 2 – Распределение напряжений (МПа) и минимальный расчетный коэффициент запаса усталостной прочности в диске колеса с диаметром 783 мм

Таким образом, выполненные расчеты подтверждают возможность безопасной эксплуатации рассмотренных колес электропоезда Flirt Belarus IS до предельного диаметра 783 мм.

Список литературы

1 **Afanaskou, P.** Analysis of the operational performance and structural integrity of undersized railway wheels in BCG electric locomotive applications / P. Afanaskou // Conference on Advanced Technologies in Engineering, 8–10 October 2025. – Tashkent, Uzbekistan. – 2026. – Vol. 3447, is. 1. AIP Conf. Proc. 3447, 070001 (2026). – URL: https://doi.org/10.1063/12.0043994 (date of access: 31.08.2026).

2 Theoretical Study of the Wear of a Reduced-Diameter Wheel for Freight Wagons // Algorithms. – URL: https://doi.org/10.3390/a17100437 (date of access: 17.08.2026).

3 **Афанаськов, П. М.** Оценка допустимости ввода в эксплуатацию железнодорожных колес с пониженным диаметром / П. М. Афанаськов, В. В. Комиссаров, Н. В. Комаровский [и др.] // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 4 (40). – С. 30–38.

4 EN 13979-1:2020. Railway applications – Wheelsets and bogies – Monobloc Wheels – Technical approval procedure. – CEN, 2020. – 66 p.

5 ГОСТ 33783-2016. Колесные пары железнодорожного подвижного состава. Методы определения показателей прочности. – Минск : Госстандарт, 2017. – 63 с.

УДК 629.463.015:539.4

О РАСЧЁТНОЙ ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ КРЫТЫХ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

С. М. БОБРИЦКИЙ
Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

В рамках объявленной в Республике Беларусь пятилетки качества вопросы безопасности и надёжности подвижного состава закреплены в числе приоритетов государственной политики. Для Российской Федерации и других стран пространства 1520 мм они не менее значимы: требования ЕАЭС едины, а сертификация взаимно признаётся. В грузовом парке заметную долю составляют крытые вагоны. С ростом массы поездов и осевых нагрузок (для распространённой модели 11-2135-01 – 230,5 кН на колёсную пару при конструкционной скорости 120 км/ч [1]) ресурс несущих конструкций всё чаще определяют нестационарные нагрузки: случайное возбуждение от неровностей пути и удары при манёвровых соударениях. Нормативная база (ТР ТС 001/2011 [2] и ГОСТ 33211-2014 [3]) опирается на детерминированные расчётные режимы с коэффициентами динамической добавки; частота встречаемости режимов и случайный характер истории нагружения при оценке усталостной повреждённости учитываются лишь косвенно [4].

Цель работы – предложить комплекс методов расчёта динамических нагрузок на элементы крытых вагонов, дополняющий действующие детерминированные расчёты спектрально-стохастическим описанием эксплуатационного нагружения.

Расчётная схема и верификация моделей. Расчётная схема сочетает конечно-элементный анализ кузова с многотельным моделированием вагона в составе поезда (по аналогии с [9]). Неровности пути задаются спектральными плотностями мощности с обязательной калибровкой по натурным измерениям на дорогах колеи 1520 мм; обобщённые спектры для обкатки моделей приняты по данным бенчмарк-исследований ERRI (отчёт B176/DT290 [9]). Схематизация случайных процессов нагружения выполняется по ГОСТ 25.101-83 [4]. Верификация расчётных моделей проводится по результатам стендовых и натурных испытаний в соответствии с ГОСТ 33788-2016 [5] в методологии приёмки по EN 14363 [8]; принятый внутренний критерий соответствия расчёт – эксперимент – не более 8 % по статическим и 10 % по динамическим режимам.

Скорости маневровых соударений и поглощающие аппараты. Расчётный диапазон скоростей соударений принят до 14 км/ч. Его обоснование опирается не на эксплуатационные нормы осаживания (3–5 км/ч), а на нормативные характеристики поглощающих аппаратов и данные натурных наблюдений. По ГОСТ 32913-2014 [7] для аппаратов класса Т1 (ПМКП-110, АПМ-120 и аналоги) нормируются: номинальная энергоёмкость – не менее 70 кДж, максимальная – не менее 90 кДж; непревышение номинальной силы 2,0 МН при соударении двух вагонов массой (100 ± 5) т каждый обеспечивается при скорости не менее 7,5 км/ч (для классов Т2 и Т3 – 9,0 и 11,0 км/ч); максимальная сила закрытия – 3,0 МН. Оценка энергии сближения показывает: при скорости 10 км/ч и двух вагонах массой около 94 т каждый кинетическая энергия соударения составляет примерно 170 кДж, что соответствует пределу суммарной ёмкости двух аппаратов (≈180 кДж). При большей скорости удар воспринимается уже хребтовой балкой и элементами кузова. Отсюда два положения, заложенные в модель: поглощающий аппарат описывается нелинейно – по полной выборке хода с характеристикой «сжатие – отдача», а контроль продольной силы в автосцепке обязателен. Сопутствующие статические силовые режимы – сжатие 2000 кН в буферной плоскости и растяжение 1500 кН на автосцепке – приняты по ГОСТ 33211-2014 [3] в соответствии с EN 12663-2 [10]. Масса соударяющихся вагонов принята по гружёному состоянию модели 11-2135-01 (93–94 т: тара 26,1–27,0 т, грузоподъёмность 67 т [2]); соударение порожних вагонов рассматривается отдельно. Натурные наблюдения на сортировочных горках фиксируют эксплуатационные скорости соударений выше регламентированных для осаживания, что и определяет выбор верхней границы диапазона.

Опубликованные результаты по аналогичным объектам. Для грузовых вагонов по данным натурных исследований характерен частотный диапазон колебаний 1,5–18 Гц; одиночные всплески ускорений от стыков и дефектов пути достигают 0,8g и более [11]. Для кузовов гружёных крытых вагонов первая собственная частота изгибных колебаний в вертикальной плоскости находится в диа-

пазоне 5–7 Гц, у порожних вагонов – выше. Норматив «не ниже 8 Гц» формально закреплён для пассажирских вагонов, поэтому его перенос на грузовой подвижной состав физически необоснован, по крайней мере без пересмотра самого критерия применительно к грузовым вагонам. Систематические данные по динамической нагруженности вагонов в эксплуатации обобщены в [12].

Для универсального полувагона в работе [13] при маневровых соударениях со скоростью до 14 км/ч (удар по подпору массой 300 т и по свободно стоящему вагону) получены осциллограммы усилий в зоне упоров автосцепного устройства (скорость 11 км/ч) и напряжений в шкворневой зоне рамы (12 км/ч). Расчётный ресурс элементов шкворневого узла составил 4,2–8,6 лет и согласуется со сроками эксплуатации вагонов до обнаружения трещиноподобных повреждений. Адекватность использованных конечноэлементных моделей кузова (227 тыс. элементов) подтверждена стендовыми и ударными испытаниями [13].

Для связи возбуждения с откликом построены передаточные функции системы «вагон – путь», оцениваемые как

$$\hat{H}_1(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)}, \tag{1}$$

где $x(t)$ – вход (возбуждение); $y(t)$ – выход (отклик); $S_{xx}(f)$ – автоспектральная плотность мощности входного процесса; $S_{xy}(f)$ – взаимная спектральная плотность мощности между входом и выходом.

Полученные функции представляют собой эквивалентные линеаризованные описания, которые справедливы лишь вблизи рабочих режимов.

Сопоставление с зарубежной практикой. Спектрально-стохастический аппарат в европейской и североамериканской практике применяется неодинаково. Глава 7 спецификации AAR M-1001 «Fatigue Design of New Freight Cars» содержит методы усталостного анализа и спектры эксплуатационных нагрузок (environmental load spectra) [14]. В европейской практике стохастические методы наиболее развиты в части верификации и валидации расчётных моделей по результатам натурных испытаний (EN 14363 [6]; обобщение – в [9]). Предлагаемый комплекс методов не отменяет обязательные детерминированные расчёты ГОСТ 33211-2014, а дополняет их.

Выводы.

1 Спектрально-стохастические методы, калиброванные по натурным измерениям, позволяют оценивать накопление усталостных повреждений от реальной истории нагружения и обоснованно прогнозировать ресурс несущих конструкций крытых вагонов, снижая риск отказов в эксплуатации.

2 Подтверждена необходимость нелинейного описания поглощающих аппаратов с учётом полной выборки хода и контроля продольной силы в автосцепке: нормативный предел эффективной работы аппаратов класса Т1 соответствует скоростям соударения около 10 км/ч для вагонов массой около 100 т [15].

3 Результаты работы могут послужить методической основой поправок к техническим нормативным правовым актам Республики Беларусь и Российской Федерации в части учёта нестационарных и стохастических нагрузок при проектировании, сертификации и продлении срока службы грузовых вагонов.

Список литературы

1 Крытый вагон модели 11-2135-01 : технические характеристики : [сайт]. – [Б. м.], [б. г.]. – URL: https://vagon.by/model/11-2135-01 (дата обращения: 12.07.2026).

2 О безопасности железнодорожного подвижного состава : ТР ТС 001/2011 : принят Комиссией Таможенного союза 15.07.2011 № 710. – [Б. м. : б. и.], 2011. – URL: https://prg.kz/document/?doc_id=31053701 (дата обращения: 18.07.2026).

3 Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам : ГОСТ 33211-2014. – Введ. 01.07.2016; с изм. № 1. – Минск : Госстандарт, 2014. – URL: https://prg.kz/document/?doc_id=35688147 (дата обращения: 22.07.2026).

4 Расчёты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций : ГОСТ 25.101-83. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4294829/4294829387.htm (дата обращения: 03.08.2026).

5 Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества : ГОСТ 33788-2016. – Минск : Госстандарт, 2016. – URL: https://vsegost.com/Catalog/63/63283.shtml (дата обращения: 09.08.2026).

6 Railway applications. Testing and simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles. Running behaviour and stationary tests : EN 14363:2016. – Brussels : CEN, 2016.

7 Аппараты поглощающие сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки : ГОСТ 32913-2014. – Введ. 01.06.2015. – М. : Стандартинформ, 2015. – URL: https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293768/4293768144.htm (дата обращения: 20.09.2026).

8 Design, Fabrication, and Construction of Freight Cars. Chapter 7 : Fatigue Design of New Freight Cars : AAR Manual of Standards and Recommended Practices. Section C, Part II. – Washington : Association of American Railroads. – URL: https://www.aar.com/standards/MSRPs/MSRP-C2%20Index.pdf (date of access: 19.08.2026).

9 **Götz, G.** Verification and validation of simulations in a rail vehicle certification context / G. Götz, O. Polach // International Journal of Rail Transportation. – 2018. – Vol. 6, № 2. – P. 83–100. – DOI: 10.1080/23248378.2017.1412839. – URL: http://polach.ch/data/object_4/IJRT_2018_Validation.pdf (date of access: 25.08.2026).

10 Railway applications. Structural requirements of railway vehicle bodies. Part 2 : Freight wagons : EN 12663-2:2010. – Brussels : CEN, 2010.

11 Исследование характеристик колебаний железнодорожных грузовых вагонов с целью определения технических требований к конструкции автономных пьезоэлектрических генераторов тока / И. Васильев, С. Генералов, О. Краснобаев, А. Чуприн // Наноиндустрия. – 2016. – № 3 (65). – С. 72–77. – EDN VWXHFB.

12 **Соколов, М. М.** Динамическая нагруженность вагона / М. М. Соколов, В. Д. Хусидов, Ю. Г. Минкин. – М. : Транспорт, 1981. – 207 с.

13 Развитие методов анализа прочности и надёжности несущих конструкций подвижного состава с использованием методов математического моделирования / В. В. Кобищанов, Д. Я. Антипин, Д. Ю. Расин, М. В. Мануева // Транспорт: наука, техника, управление. – 2020. – № 3. – С. 29–37. – DOI: 10.30987/1999-8775-2020-3-29-37. – URL: https://cyberleninka.ru/ article/n/razvitie-metodov-analiza-prochnosti-i-nadezhnosti-nesuschih-konstruktsiy-podvizhnogo-sostava-s-ispolzovaniem-metodov-matematicheskogo (дата обращения: 10.09.2026).

14 Design, Fabrication, and Construction of Freight Cars. Chapter 7 : Fatigue Design of New Freight Cars : AAR Manual of Standards and Recommended Practices. Section C, Part II. – Washington : Association of American Railroads. – URL: https://www.aar.com/standards/MSRPs/MSRP-C2%20Index.pdf (date of access: 19.08.2026).

15 Аппараты поглощающие сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки : ГОСТ 32913-2014. – Введ. 01.06.2015. – М. : Стандартинформ, 2015. – URL: https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293768/4293768144.htm (дата обращения: 20.09.2026).

УДК 629.018

К ВОПРОСУ КОНКРЕТИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ТАРИРОВКИ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ НЕОБРЕССОРЕННЫХ МАСС ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ХОДОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

П. М. БУЙЛЕНКОВ
Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»), г. Москва, Российская Федерация

С. А. СКОРОХОДОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Проектирование и изготовление грузовых железнодорожных вагонов тесно связаны с выполнением требований по обеспечению надежности и прочности конструкции, безопасной эксплуатации в течение назначенного срока службы. Подтверждение соответствия этих показателей возможно путем проведения различных видов испытаний, одним из которых являются ходовые динамические испытания.

Особый интерес вызывают показатели динамики необрессоренных масс тележек при движении вагона в порожнем состоянии. Особенно сильно это отражается на динамических показателях порожнего грузового вагона даже при испытаниях нового подвижного состава: максимальные значения динамических показателей резко возрастают и достигают величин, близких к допускаемым значениям, уже при скоростях движения 70–90 км/ч.

Это связано с рядом причин, среди которых несоответствие параметров ходовых частей заявленным, влияние возникающей продольной силы, состояние железнодорожного пути, а также «мнимые» (полученные с большой погрешностью) значения показаний измерительного оборудования из-за ошибок монтажа тензорезисторов или несовершенства методики подготовки тележек к ходовым динамическим испытаниям.

Рассмотрим последнюю причину – методику подготовки тележек к проведению ходовых динамических испытаний, включающую в себя монтаж тензометрических измерительных схем и проведение их тарировки.

Так, РД 24.050.37-95 указывает на следующее: «Для определения фактических величин статических прогибов рессорного подвешивания и напряжений в элементах тележек под нагрузкой от силы тяжести вагона, проверки чувствительности измерительных схем и т. д. производятся контрольные (тарировочные) подъемки кузова вагона до полного обезгруживания тележек» [3].

ГОСТ 33788-2016 указывает на следующее: «Для измерения сил, действующих на тележку от колесной пары и кузова вагона (рамной силы, коэффициента динамической добавки обрессоренных и необрессоренных частей), применяют тензорезисторы, установленные на раме тележки, боковой раме и надрессорной балке. Рекомендуемые схемы установки тензорезисторов приведены в приложении Б. Определение масштаба измерения силы и коэффициентов динамической добавки производят статически с применением средств измерения силы с характеристиками, указанными в таблице 1» [2].

Аналогичные указания имеются и в методиках испытаний локомотивов и специального подвижного состава, изложенных в ГОСТах, что также не конкретизирует выполнение обезгрузки элементов тележки, посредством которых выполняются измерения.

На практике при проведении тарировки измерительных схем для определения коэффициентов вертикальной динамики необрессоренных частей тележки грузового вагона ввиду отсутствия четкой последовательности выполнения операций используется следующая методика:

– кузов (рама) вагона поднимается с использованием домкратов до момента появления зазоров между пятниками вагона и подпятниками тележек, а затем опускается в исходное положение, без проведения замеров;

– снимается нулевое («0») значение измерительных схем;

– домкратами поднимается кузов вагона до момента появления зазоров между пятниками вагона и подпятниками тележек;

– регистрируются показания измерительных схем при поднятом кузове вагона и принимаются за единичное «1» значение;

– кузов вагона опускается на подпятники тележки до освобождения домкратов;

– замеры повторяются минимум три раза, при устойчивых показаниях измерительных схем.

Данный подход коррелирует с рекомендациями, представленными в РД 24.050.37-95. Однако этот способ тарировки не обеспечивает обезгрузку челюстных проемов, в которых установлены измерительные схемы.

По предлагаемой методике, для более точного определения коэффициентов вертикальной динамики при проведении ходовых динамических испытаний, тарировка измерительных схем тележек должна проводиться с регистрацией показаний двух этапов:

– фиксация нулевого значения измерительных схем;

– отключение тормозной системы от тележек и поднятие кузова вагона с фиксацией коэффициента от «кузова»;

– выкатка тележек, фиксация нулевого значения измерительных схем, обезгруживание челюстных проемов боковых рам тележек, в которых установлены измерительные схемы, подъемом при помощи грузозахватных механизмов боковых рам и надрессорных балок с фиксацией коэффициента от «тележки». Схема строповки не должна оказывать влияния на деформации в челюстных проемах;

– суммирование полученных тарировочных значений для определения «истинного» тарировочного коэффициента, соответствующего единице («1»).

По результатам выполненных экспериментов было установлено, что занижение коэффициентов динамики составило от 16 до 23 %, в зависимости от массы тары: разность тарировочных коэффициентов, полученных при подъемке только кузова вагона и при подъемке кузова вагона с элементами тележек (боковыми рамами), уменьшается при увеличении массы тары вагона.

Заключение.

Тарировка с полным обезгруживанием челюстного проема тележки грузового вагона:

– существенно снизит вероятность появления значений превышающих «1» (исключение составит лишь возможное «закусывание» рамы тележки в буксовых проемах, а также другие факторы, не рассмотренные в данной статье);

– позволит более точно определять динамические характеристики вагона (погрешность измерений для порожнего вагона снизится более существенно, чем для груженого вагона).

Список литературы

1 ГОСТ 32265-2013. Специальный подвижной состав. Методика динамико-прочностных испытаний. – Введ. 2014–07–01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 13 с.

2 ГОСТ 33788-2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. – Введ. 2016–04–01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 41 с.

3 РД 24.050.37-95 Вагоны грузовые и пассажирские. Методы на прочность и ходовые качества. – Введ. 02.02.1995. – М. : ГосНИИВ, 1995. – 101 с.

4 ГОСТ 32265-2013. Специальный подвижной состав. Методика динамико-прочностных испытаний: межгос. стандарт. – Введ. 2013–08–28. – М. : Стандартинформ, 2016. – 12 с.

5 ГОСТ Р 55514-2013. Локомотивы. Методика динамико-прочностных испытаний. – Введ. 2014–07–01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 14 с.

6 **Анисимов, П. С.** Испытания вагонов / П. С. Анисимов. – М. : Маршрут, 2004. – 197 с.

7 Проведение ходовых динамических испытаний грузовых вагонов с применением тензометрической колесной пары / А. В. Третьяков, А. А. Петров, К. В. Елисеев, М. В. Зимакова // Известия ПГУПС. Современные технологии – транспорту. – 2017. – С. 127–136.

УДК 629.4.053(075.8)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ДВИЖЕНИИ

В. В. БУРЧЕНКОВ, А. В. КОЛЕНЧИКОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

П. А. КРОТ
Белорусская железная дорога, г. Минск

Ведущая роль в транспортных системах многих государств отводится железнодорожному транспорту. Белорусская железная дорога выполняет от 35 до 40 % грузовых перевозок и 20–25 % общего пассажирооборота в Республике Беларусь. Проблематика повышения уровня надежности подвижного состава при эксплуатации и показателей качества его ремонта является важной общегосударственной задачей.

Для решения задач цифровизации железнодорожного транспорта необходимо создать ряд технологически развитых, автоматических систем, устанавливаемых по обе стороны железнодорожной колеи и интегрированных на единой цифровой платформе, которые при мониторинге технического состояния скоростных контейнерных поездов дают возможность, в частности, повысить эффективность технического обслуживания и ремонта ответственных агрегатов и механизмов вагонов – платформ.

Исследования в области технологий мониторинга технического состояния подвижного состава, основанные на распределенных виртуальных акустических датчиках, носят разрозненный характер и не обеспечивают системной интеграции устройств бесконтактного контроля деталей и узлов ходовой части вагонов. Значимой проблемой остается оперативное выявление контрафактных и фальсифицированных деталей, используемых при обслуживании и текущем ремонте вагонов, а также продлении сроков эксплуатации. Актуальной задачей является решение технических вопросов централизации систем технического контроля и диагностики подвижного состава на ходу поезда, конфигурирования информационно-коммуникационных систем для комплексных измерений и диагностики вагонов.

Для безопасного функционирования подвижного состава, повышения эффективности эксплуатации скоростных контейнерных поездов, совершенствования качества ремонта вагонов необходимо обеспечить высокоинформативный и достоверный контроль технического состояния отдельных узлов и агрегатов платформ на ходу поезда.

Диагностические устройства и комплексы, предназначенные для диагностики подвижного состава (ПС) на ходу поезда, относятся к классу сложных систем. Они имеют последовательный алгоритм обработки информации, и поэтому неисправность отдельного компонента системы приводит к частичному или полному отказу всей системы.

Вероятность отказов деталей и узлов диагностических систем зависит от условий эксплуатации. Современные диагностические системы имеют встроенные подсистемы самодиагности. Однако для

технического обслуживания и проверки соответствия технических параметров установленным техническим нормам необходимо проведение регламентных работ. Выполнение этих работ, как показывает практика, не гарантирует безотказное функционирование аппаратуры диагностики.

Время восстановления отказавшей аппаратуры в общем виде складывается из следующих составляющих: времени извещения обслуживающего персонала об отказе устройства и доставки специалистов к неисправному периферийному устройству; времени поиска неисправности и устранения отказа.

Время восстановления неисправной информационной измерительной системы (ИИС) также зависит от ряда организационных, технических и технологических причин:

– ограниченность и неточность информации, поступающей от эксплуатационного штата ДСП, ДНЦ, операторов автоматизированных рабочих мест пунктов технического обслуживания (АРМ ПТО);

– отсутствие на перегонных постах измерительной техники для полного контроля всех параметров, а также запасных частей и приборов (ЗИП), из-за чего отказавшие модули и блоки необходимо доставлять на контрольно-измерительные пункты;

– применение сложных ИИС, требующее специальной подготовки персонала и значительных затрат времени на восстановление работоспособности отказавшего устройства.

Применительно к устройствам КТСМ с их пространственным размещением оборудования на перегонах и станциях актуальна разработка оптимальных алгоритмов локализации и устранения отказов, контроля и регулировки параметров системы. Задачи целесообразности автоматического дистанционного диагностирования для перспективных и внедряемых периферийных устройств контроля ПС должны решаться с учётом следующих показателей назначения:

– автоматического определения работоспособного состояния, в котором в настоящий момент находится система или устройство;

– прогнозируемого состояния в будущем, в котором окажутся периферийные устройства КТСМ при возмущающих эксплуатационных и физических воздействиях (удары молнии, вандализм, хищения и т. д.);

– эффективного использования режимов параллельного решения задач измерений параметров и технического прогнозирования.

Теория построения и комплексирования ИИС основана на формировании комплексной системы автоматического управления и диагностики подвижного состава (КСАУДПС). КСАУДПС должна обеспечивать повышение надежности перевозочного процесса за счет использования коммуникационных и ИИС. Она предполагает решение следующих задач:

– формирование цифровых моделей вагонов, локомотивов и ИИС;

– разработку методов повышения достоверности используемых в КСАУДП баз данных;

– разработку многоуровневой функциональной структуры КСАУДП с учетом технологических регламентов содержания ПС;

– расширение функционала диагностируемых признаков;

– создание КСАУДП на основе цифровой распределенной платформы.

В структурированном виде Теория построения и комплексирования КСАУДПС приведена на рисунке 1.

Она позволяет реализовать следующие функции:

– определение и классификацию перегретых буксовых узлов;

– регистрацию волочащихся деталей;

– выявление негабаритности подвижного состава;

– определение ползунов, наваров и других дефектов колесных пар;

– фиксацию контрафактных и фальсифицированных деталей ходовой части вагонов;

– автоматический учет осей и вагонов;

– дистанционное акустическое зондирование дефектов на ходу поезда;

– непрерывный мониторинг подвижного состава на ходу поезда;

– распределение цифровых показателей дефектов по классам неисправностей;

– синтез законов управления локомотивом на основе показателей качества.

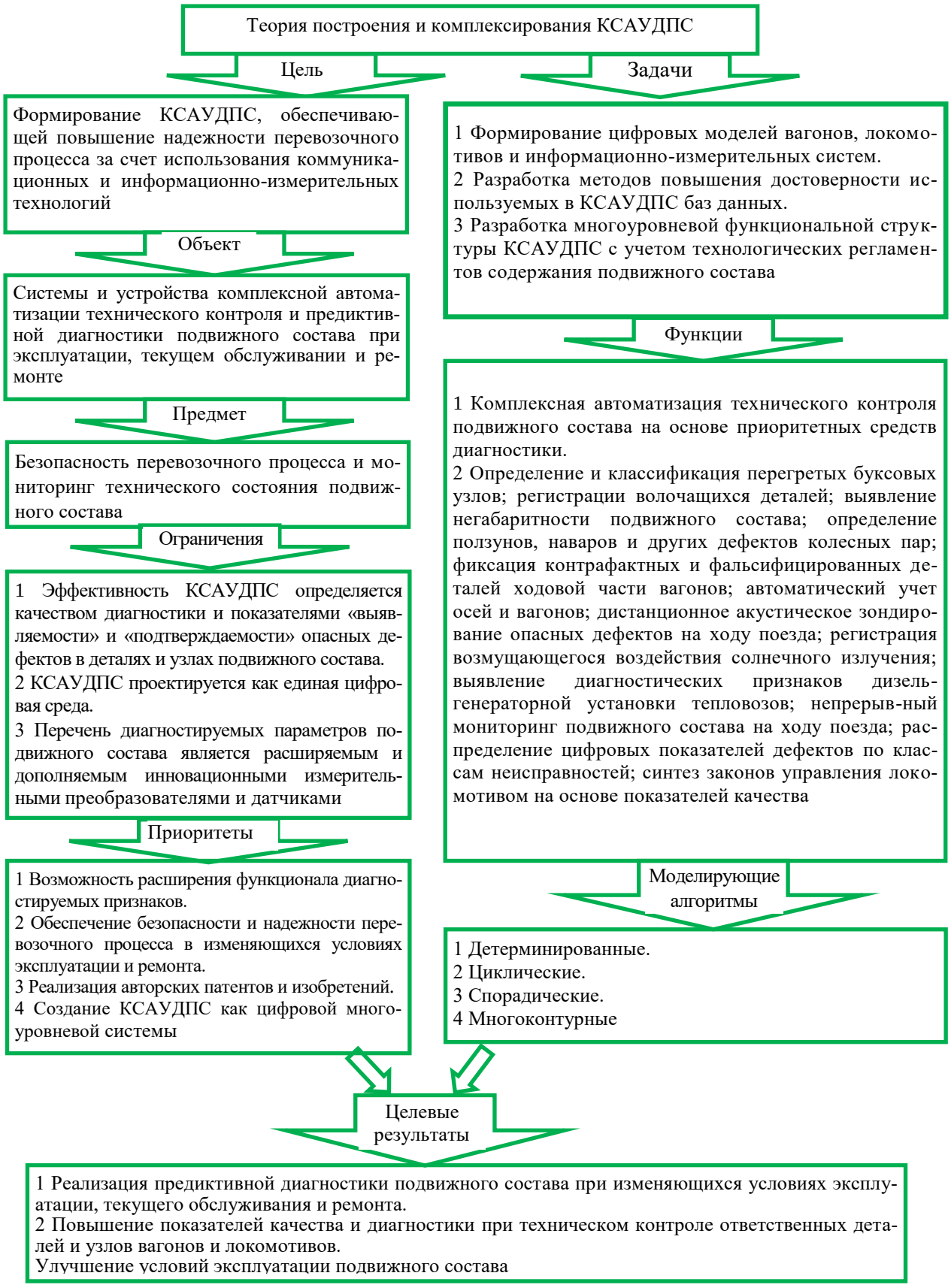

Теория построения и комплексирования КСАУДПС
Цель
Задачи
Формирование КСАУДПС, обеспечивающей повышение надежности перевозочного процесса за счет использования коммуникационных и информационно-измерительных технологий
1 Формирование цифровых моделей вагонов, локомотивов и информационно-измерительных систем.
2 Разработка методов повышения достоверности используемых в КСАУДПС баз данных.
3 Разработка многоуровневой функциональной структуры КСАУДПС с учетом технологических регламентов содержания подвижного состава
Объект
Системы и устройства комплексной автоматизации технического контроля и предиктивной диагностики подвижного состава при эксплуатации, текущем обслуживании и ремонте
Функции
1 Комплексная автоматизация технического контроля подвижного состава на основе приоритетных средств диагностики.
2 Определение и классификация перегретых буксовых узлов; регистрации волочащихся деталей; выявление негабаритности подвижного состава; определение ползунов, наваров и других дефектов колесных пар; фиксация контрафактных и фальсифицированных деталей ходовой части вагонов; автоматический учет осей и вагонов; дистанционное акустическое зондирование опасных дефектов на ходу поезда; регистрация возмущающегося воздействия солнечного излучения; выявление диагностических признаков дизель-генераторной установки тепловозов; непрерыв-ный мониторинг подвижного состава на ходу поезда; распределение цифровых показателей дефектов по классам неисправностей; синтез законов управления локомотивом на основе показателей качества
Предмет
Безопасность перевозочного процесса и мониторинг технического состояния подвижного состава
Ограничения
1 Эффективность КСАУДПС определяется качеством диагностики и показателями «выявляемости» и «подтверждаемости» опасных дефектов в деталях и узлах подвижного состава.
2 КСАУДПС проектируется как единая цифровая среда.
3 Перечень диагностируемых параметров подвижного состава является расширяемым и дополняемым инновационными измерительными преобразователями и датчиками
Моделирующие алгоритмы
1 Детерминированные.
2 Циклические.
3 Спорадические.
4 Многоконтурные
Приоритеты
1 Возможность расширения функционала диагностируемых признаков.
2 Обеспечение безопасности и надежности перевозочного процесса в изменяющихся условиях эксплуатации и ремонта.
3 Реализация авторских патентов и изобретений.
4 Создание КСАУДПС как цифровой многоуровневой системы
Целевые результаты
1 Реализация предиктивной диагностики подвижного состава при изменяющихся условиях эксплуатации, текущего обслуживания и ремонта.
2 Повышение показателей качества и диагностики при техническом контроле ответственных деталей и узлов вагонов и локомотивов.
Улучшение условий эксплуатации подвижного состава

Рисунок 1

Целевые результаты теории построения и комплексирования КСАУДПС предусматривают:

– реализацию предиктивной диагностики ПС состава при изменяющихся условиях эксплуатации, технического обслуживания и ремонта;

– повышение показателей качества и диагностики при техническом контроле ответственных деталей и узлов вагонов и локомотивов;

– улучшение условий эксплуатации ПС.

Сбор информации о подвижном составе с централизацией результатов контроля осуществляется в базах данных Автоматизированной системы контроля подвижного состава (АСК ПС). Централизация в масштабах дороги позволяет не только следить за развитием неисправностей ответственных узлов подвижного состава на участках движения поездов, но и своевременно выявлять отказы и сбои в работе самих устройств контроля. В реальном масштабе времени на экраны мониторов автоматизированных рабочих мест линейных пунктов контроля (АРМ ЛПК) выводятся перечень пунктов контроля с температурами настройки средств контроля, расширенный режим поиска подвижных единиц по заданному условию (типу и числу подвижных единиц; выборке показаний с тревожной сигнализацией разного уровня; обнаруженным в поезде неисправностям вагонов и локомотивов, в том числе с заторможенными колесами из-за неисправности тормозной системы; дефектами колес по поверхности катания в виде ползунов и наваров; с нарушением геометрических параметров колес; нарушением габаритных размеров вагонов; неисправностями ударно-тяговых механизмов автосцепок и др.).

Реализация концепций теории построения и комплексирования КСАУДПС позволила определить направления совершенствования технологии раннего выявления дефектов ходовых частей специализированных платформ для скоростных контейнерных поездов, а также сформулировать технологию информационного взаимодействия АРМ ПТО с системами периферийной диагностики подвижного состава.

Разработка методики расчетов производительности труда при ремонте колесных пар вагонов позволила определить этапы цифровизации планирования и учета ремонтных операций при текущем отцепочном и деповском ремонтах.

Список литературы

1 **Бурченков, В. В.** Автоматизация технического контроля и диагностики подвижного состава : монография / В. В. Бурченков. – Гомель : БелГУТ, 2020. – 254 с.

2 **Бурченков, В. В.** Цифровые технологии для совершенствования технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов / В. В. Бурченков // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 1 (44). – С. 47–51.

УДК 004.8:629.4:621.869.888

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ СОЗДАНИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ И КОНТЕЙНЕРОВ

М. Г. ГЕГЕДЕШ

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

А. В. ВОРОЖУН

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

А. А. МАРКАВЦОВ

Конструкторско-технический центр Белорусской железной дороги, г. Минск

Современный этап развития железнодорожного транспорта характеризуется переходом от планово-предупредительной системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов и контейнеров к ремонту по фактическому техническому состоянию. Базовым инструментом для реализации этого перехода является концепция цифрового двойника (Digital Twin) [1–3], которую возможно внедрить на всех этапах жизненного цикла грузового вагона. Цифровой двойник грузового вагона представляет собой динамическую конвергентную систему, объединяющую виртуальный прототип (высокоточные 3D-модели, расчетные схемы прочности и кинематики), физический объ-

ект (реальный вагон, находящийся в эксплуатации и оснащенный бортовыми и/или путевыми средствами мониторинга) и связующие каналы данных (двусторонний обмен информацией в режиме, близком к реальному времени).

Целью представленной работы является оценка возможности создания и экспериментального обоснования методики интеграции алгоритмов машинного обучения в структуру цифрового двойника, позволяющей с заданной точностью предсказывать остаточный ресурс рамы вагона и стенок контейнера при типовых режимах нагружения.

Создание цифрового двойника начинается с формирования цифрового профиля объекта, включающего сведения из паспорта вагона, нормативно-технической и технологической документации, результатов осмотров и данных о плановых видах ремонта. Затем к объекту привязываются датчики и программные интерфейсы, через которые поступает информация в единую систему после очищения данных и приведения их к единому формату. Системы искусственного интеллекта (далее – ИИ) могут применяться для обнаружения пропущенных данных, а также статистически некорректных выбросов и противоречивых показаний. Машинное обучение применяется для анализа поведения объекта в различных условиях. Модель обучается на массиве данных эксплуатации и ремонта и может сопоставлять параметры исправных вагонов с характеристиками объектов, у которых позднее обнаружилась неисправность. Для создания обучающих выборок для ИИ-моделей может быть использована классификация нагрузок, действующих на подвижной состав, ориентированных на диагностику и прогнозирование технического состояния (рисунок 1).

В системе управления жизненным циклом грузового вагона и контейнера концепция цифрового двойника решает три ключевые задачи:

1) верификация конструктивных решений до создания натурного образца на основе анализа критических режимов нагружения в специализированных инженерных комплексах (FEA);

2) непрерывная оценка остаточного ресурса конструктивных элементов кузова вагона и контейнера, прогнозирование отказов узлов (буксовые узлы, колесные пары, элементы тележки, двери контейнера и др.) в процессе эксплуатации;

3) накопление статистики отказов для изменения геометрии, модернизации конструкции и снижения материалоемкости вагонов новых поколений.

Интеграция цифрового двойника требует создания отказоустойчивой информационно-измерительной архитектуры, которая может быть построена по трехкомпонентному принципу:

1) нижний (аппаратный) уровень: датчики вибрации (акселерометры), температуры, тензорезисторы для измерения деформаций, бортовые контроллеры для сбора данных;

2) средний (транспортный) уровень: передача данных с движущегося состава на стационарные серверы посредством беспроводных промышленных протоколов с возможной их интеграцией в уже существующие линии передачи информации;

3) верхний (аналитический / платформа двойника) уровень: централизованная база данных; модуль синхронизации, связывающий входящий поток телеметрии с конкретной геометрической координатой вагона на расчетной схеме.



Рисунок 1 – Классификация нагрузок, действующих на подвижной состав, для обучения систем ИИ

Интеграция ИИ и классического конечно-элементного анализа (FEA/МКЭ) реализуется через концепцию суррогатного моделирования (Surrogate Modeling) [4, 5]. Прямой расчет методом конечных элементов в реальном времени невозможен из-за значительных вычислительных затрат. Поэтому полноразмерная конечно-элементная модель вагона (например, в программном комплексе ANSYS) рассчитывается заранее для базовых сценариев нагружения. На основе этих расчетов строится матрица чувствительности наиболее нагруженных зон (радиусы R50 боковой рамы, зоны

соединения шкворневой и хребтовой балок). С использованием матрицы чувствительности обучается искусственная нейронная сеть радиально-базисного типа, выполняющая роль суррогатной модели. Она мгновенно пересчитывает поле напряжений во всём объеме конструкции, принимая на вход лишь несколько граничных условий от датчиков и динамической модели ИИ. Результатом интеграции является непрерывное обновление цифровой «карты напряжений» вагона. Если ИИ фиксирует рост амплитуд напряжений в конкретном узле, суррогатная модель автоматически пересчитывает коэффициент запаса усталостной прочности, обновляя статус остаточного ресурса несущей конструкции в ядре цифрового двойника.

Таким образом, возможна разработка гибридной модели цифрового двойника грузового вагона и контейнера, в которой ИИ (нейронные сети) компенсирует неточности физических моделей и обеспечивает адаптивное прогнозирование износа элементов конструкции на основе данных реальной эксплуатации. В сфере железнодорожных перевозок и контейнерной логистики внедрение цифровых двойников с использованием ИИ становится ключевым фактором повышения безопасности движения поездов и эффективности использования, а также снижения эксплуатационных расходов.

Список литературы

1 Digital twin modeling / F. Tao, B. Xiao, Q. Qi [et al.] // Journal of Manufacturing Systems. – 2022. – Vol. 64. – P. 372–389.

2 Digital Twin: Origin to Future / M. Singh, E. Fuenmayor, E. P. Hinchy [et al.] // Applied System Innovation. – 2021. – Vol. 4 (2). – Art. 36.

3 **Зуев, Д. В.** Развитие интеллектуальных транспортных систем: цифровые двойники в железнодорожной отрасли / Д. В. Зуев // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2025. – № 4 (44). – С. 33–46.

4 **Hou, C. K. J.** Dimensionality Reduction in Surrogate Modeling: A Review of Combined Methods / C. K. J. Hou, K. Behdinan // Data Science and Engineering. – 2022. – Vol. 7. – P. 402–427.

5 **Alizadeh, R.** Managing computational complexity using surrogate models: a critical review / R. Alizadeh, J. K. Allen, F. Mistree // Research in Engineering Design. – 2020. – Vol. 31. – P. 275–298.

УДК 539.43:629.423

СНИЖЕНИЕ МАССЫ РАМЫ КУЗОВА ВАГОНА ЭЛЕКТРОПОЕЗДА

Р. В. ГУЧИНСКИЙ
ООО «Троицкий крановый завод», Институт проблем машиноведения РАН,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для моторвагонного подвижного состава основным направлением модернизации является повышение конструкционных скоростей и рост энергоэффективности. Достижение этих целей существенно ограничивается общей массой подвижного состава. Избыточная масса подвижного состава негативно сказывается на затратах энергии при разгоне и торможении, ускоряет деградацию элементов пути и узлов ходовых частей. Значительное влияние оказывает масса кузова на частоту собственных изгибных колебаний кузова [1, 2]. При снижении массы необходимо обращать внимание на снижающуюся жесткость кузова [3]. Поскольку кузов вагона является наиболее металлоемкой частью вагона, его облегчение является первоочередной инженерной задачей. В пределах самого кузова около 50 % массы приходится на раму, воспринимающую основные силовые потоки, что делает ее наиболее перспективной частью кузова для проведения топологической и параметрической оптимизации.

Традиционная силовая схема рамы кузова, применяемая на большинстве отечественных электропоездов, базируется на укороченных хребтовых балках, шкворневых узлах и системе раскосов. Подобная схема разрабатывалась с учетом нормативных продольных соударений высокой интенсивности (до 2–2,5 МН). Тем не менее классическая компоновка обладает существенным недостатком: в зонах сопряжения шкворневой и хребтовой балок с раскосами вектор передачи усилий меняет направление. Это приводит к возникновению выраженных зон концентрации напряжений, для компенсации которых приходится закладывать избыточную толщину проката, что повышает металлоемкость. Анализ оптимальных траекторий силовых потоков показывает два альтернативных пути модернизации: 1) схема с длинными раскосами, в которой усилия от узла сцепного устройства

передаются напрямую к боковым обвязочным балкам по кратчайшей траектории; 2) безраскосная схема, предполагающая объединение концевых сечений в сплошную хребтовую балку, проходящую через всю длину вагона.

Для определения наиболее эффективной схемы было выполнено компьютерное моделирование четырех вариантов исполнения рамы на базе вагона электропоезда. При расчете учитывалось действие нормативного сжимающего усилия в 2 МН в сочетании с вертикальной нагрузкой от веса брутто (собственный вес и масса пассажиров). В качестве конструкционного материала рассматривалась сталь марки 09Г2С. В таблице 1 и на рисунке 1 представлены результаты сопоставительного анализа конфигураций рамы в сравнении с базовым вариантом.

Таблица 1 – **Сопоставление силовых схем рамы**

Вариант рамы	Описание силовой схемы	Тип обвязочного профиля	Статический прогиб от веса брутто, мм	Первая частота собственных колебаний кузова, Гц	Снижение веса	
					абсолютное, кг	относительное, %
1	Базовый	Труба	11,9	7,68	–	–
2	Длинные раскосы		13,6	7,73	544	8,2
3	Непрерывная хребтовая балка		12,7	7,71	344	5,2
4		Швеллер	13,0	7,64	716	10,8

На основе энергетической теории прочности (критерий Мизеса) были получены поля эквивалентных напряжений для каждого из четырех расчетных вариантов рамы при действии квазистатического сжатия.

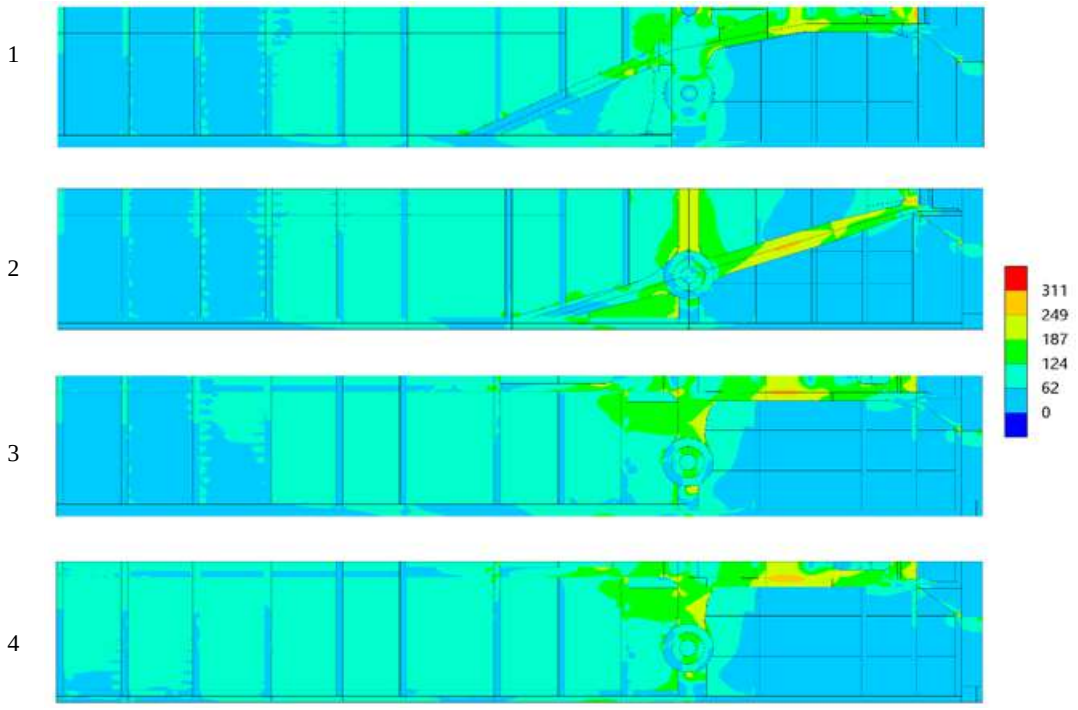


Рисунок 1 – Поля эквивалентных напряжений по Мизесу в расчетном случае Ia (МПа):
1 – базовый вариант; *2* – схема с удлиненными раскосами; *3* – сквозная хребтовая балка;
4 – сквозная хребтовая балка с ослабленным сечением обвязки

При применении схемы с длинными раскосами (вариант 2) материал работает более эффективно, чем в базовом исполнении. Однако в месте скругления нижнего листа укороченной хребтовой балки образуется локальная концентрация напряжений. Из-за особенностей перераспределения сил эта схема требует уменьшения ширины шкворневой балки, что делает невозможным сохранение стандартного шкворневого узла и вынуждает использовать связь кузова с тележкой посредством наклонных тяг. Концепция со сквозной хребтовой балкой (варианты 3 и 4) показывает наилучшую

жесткость. Так как поток продольных усилий по мере удаления от консолей постепенно переходит на боковые стены кузова, центральную часть хребтовой балки можно существенно облегчить, снизив толщину ее стенок до 4 мм (против 8 мм на консольных частях). Лучший эффект получен в варианте 4: передача продольного усилия по центральной оси позволила отказаться от замкнутого обвязочного профиля, заменив его стандартным швеллером. Это снизило крутильную жесткость обвязки и незначительно повысило средние напряжения в настиле пола, однако все жесткостные и прочностные показатели остались в пределах допускаемых значений.

Проведенное исследование показывает, что оптимизация консольных зон рамы позволяет существенно снизить общую металлоемкость кузова моторвагонного подвижного состава. Удаление неэффективных элементов и изменение направлений потока усилий обеспечивают снижение массы рамы в пределах 11 %. Сравнительный анализ показал, что безраскосная схема со сквозной хребтовой балкой переменного сечения и облегченным обвязочным профилем (вариант 4) является приоритетной. Она обеспечивает максимальное снижение веса (более 700 кг) при незначительном росте статического прогиба. Важнейшим преимуществом данной схемы является возможность сохранения классического шкворневого соединения кузова с тележкой, что исключает необходимость переработки конструкции ходовых частей вагона. Снижение массы несущих элементов практически не влияет на динамические качества кузова вагона: частота его изгибных колебаний уменьшается на 0,5 % [4].

Список литературы

1 **Гучинский, Р. В.** Оптимизация конструкции кузова вагона электропоезда по значению частоты собственных колебаний / Р. В. Гучинский // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2021. – Т. 80, № 3. – С. 152–159.

2 **Гучинский, Р. В.** Расчет частоты собственных изгибных колебаний кузова вагона электропоезда с учетом податливости опор / Р. В. Гучинский // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (42). – С. 4–11.

3 Обоснование конструктивных решений по повышению жесткости несущей конструкции кузова пассажирского вагона / Д. Я. Антипин, Е. В. Лукашова, А. П. Болдырев, Ф. Ю. Лозбинев // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 5 (17). – С. 60–68.

4 **Гучинский, Р. В.** Влияние жесткости оборудования на собственную частоту изгибных колебаний кузова вагона электропоезда / Р. В. Гучинский // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – Т. 77, № 4. – С. 251–255.

УДК 533.6.011:004.94

ОБТЕКАНИЕ ПОТОКОМ ВОЗДУХА СОСТАВА ИЗ НЕСКОЛЬКИХ ЗАГРУЖЕННЫХ КОНТЕЙНЕРАМИ ВАГОНОВ-ПЛАТФОРМ

О. В. ДЕМЬЯНЧУК
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В настоящее время эксплуатация железнодорожного подвижного состава требует учитывать особенности конструкции вагонов для более точного определения действующих на них аэродинамических сил. Большая часть исследований, посвященных аэродинамике железнодорожного подвижного состава, приходится на анализ аэродинамических характеристик пассажирских поездов. Однако в последнее время наблюдается значительный интерес к аэродинамике грузовых поездов. Компьютерное моделирование как метод анализа аэродинамических характеристик различных транспортных средств является одним из наиболее перспективных в мировых исследованиях [1, 2].

В программном комплексе ANSYS с использованием модуля Fluent выполнено моделирование обтекания воздушным потоком состава, включающего четыре платформы, которые загружены 40-футовыми контейнерами. Параметры моделирования задавались в соответствии с ранее выполненными работами [3, 4].

Численное моделирование выполнялось на основе решения уравнения неразрывности и осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, для замыкания которых была использована модель турбулентности k–ε.

По результатам моделирования получены картины распределения давления на боковых и лобовых поверхностях вагонов и контейнеров. Максимальные значения принимает давление на лобовой поверхности первого по ходу движения вагона. Для остальных вагонов картины распределения давлений схожи и имеют значительно более низкие значения давления (рисунок 1).

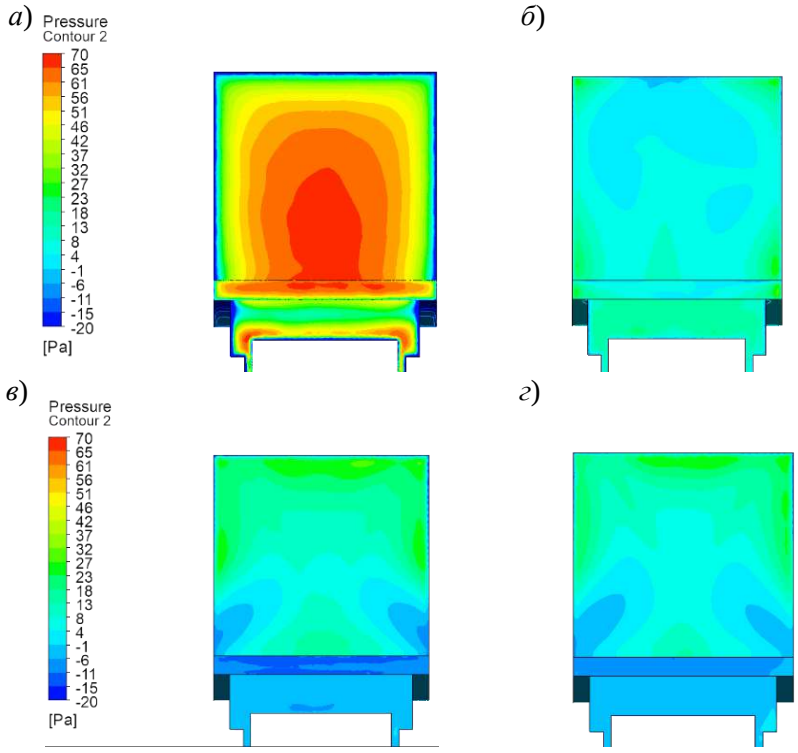


Рисунок 1 – Распределение давлений на поверхностях загруженных контейнерами вагонов-платформ:
а – первого; *б* – второго; *в* – третьего; *г* – четвертого

Из рисунка 2 видно, что у первого вагона наблюдается зона пониженного давления в головной части вагона, хвостовые вагоны имеют схожие картины распределения давления.

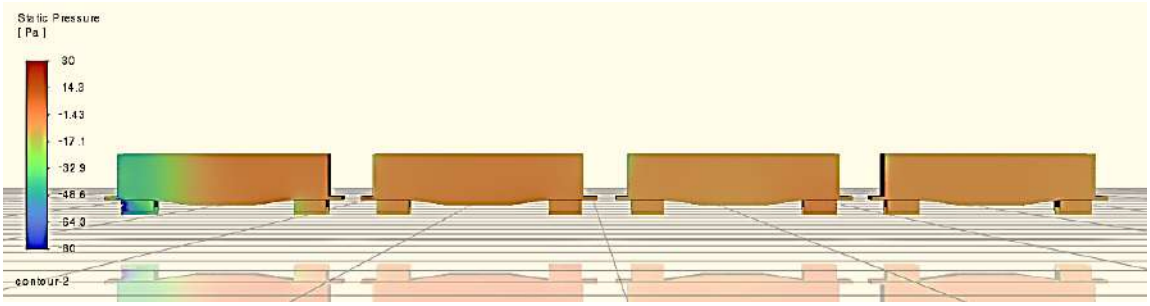


Рисунок 2 – Распределения давления на боковых поверхностях железнодорожного состава

По результатам моделирования были получены значения аэродинамических сил, действующих на вагоны состава, на основании которых определены значения коэффициента аэродинамического сопротивления C_x [5],

$$C_x = \frac{2F}{\rho v^2 A},$$

где F – значение силы, действующей на тело при обтекании его воздухом, Н; ρ – плотность воздуха, кг/м^3; v – скорость потока воздуха, м/с; A – площадь поперечного сечения обтекаемого тела, м^2.

В таблице 1 приведены значения полученных аэродинамических сил, действующих на загруженные контейнерами платформы, и их коэффициенты аэродинамического сопротивления.

Таблица 1 – **Аэродинамические характеристики вагонов-платформ**

Состав	Вагон сцепа	Сила сопротивления, Н	Коэффициент аэродинамического сопротивления
Четырех-вагонный	Первый	407	0,823
	Второй	91	0,184
	Третий	89	0,179
	Четвертый	106	0,213

Из таблицы 1 видно, что наименьшая аэродинамическая сила действует на промежуточный вагон. При этом значения аэродинамической силы, действующей на второй и третий вагоны сцепа, практически не отличаются. Из этого можно сделать вывод о достаточности данных, полученных по результатам моделирования состава из четырех вагонов, для анализа аэродинамических характеристик составов из большего числа вагонов.

Полученные результаты могут быть использованы для анализа аэродинамики иных транспортных средств, а также при анализе энергоэффективности грузовых перевозок.

Список литературы

1 Effect of the formation type with different freight vehicles on the train aerodynamic performance / X. Huo, T. Liu, Z. Chen [et al.] // Vehicle System Dynamics. – 2022. – Vol. 60, is. 11. – P. 3868–3896.

2 Optimization of cargo distribution for high-speed freight trains to overcome strong wind conditions / D. Zhang, F.-R. Zhou, W.-K. Ao [et al.] // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2024. – Vol. 18. – Article 2434008. – 16 p.

3 **Шимановский, А. О.** Влияние направления воздушного потока на аэродинамические силы, действующие на транспортное средство / А. О. Шимановский, О. В. Демьянчук // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2025. – Т. 84, № 2. – С. 81–91.

4 **Демьянчук, О. В.** Компьютерное моделирование обтекания воздушным потоком вагонов различных типов / О. В. Демьянчук // Актуальные вопросы машиноведения. – 2025. – Т. 14. – С. 247–250.

5 **Sun, Z.** Research on aerodynamic optimization of high-speed train's slipstream / Z. Sun, S. Yao, G. Yang // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2020. – Vol. 14, is. 1. – P. 1106–1127.

УДК 621.31

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ВЫБОРУ МОДУЛЬНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПО КРИТЕРИЮ ОТКЛЮЧЕНИЯ ПРИ ОДНОФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

И. С. ЕВДАСЁВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Е. Н. ГУЛЕНКОВ
Белорусская железная дорога, г. Гомель

Выбор аппаратов защиты в электрических сетях – это многоцелевая задача комплексного обеспечения: электробезопасности человека или животного путем защитного отключения поврежденной цепи электросети; надежного отключения линий электропередачи и предотвращения пожара и/или взрыва при сверхтоках в аномальных (аварийных) режимах; надежного электроснабжения путем недопущения «ложных» отключений сети или ее части в плановых режимах, например, в периоды коммутации.

Наибольшее распространение в электроустановках до 1 кВ жилых, общественных и промышленных зданий, а также их наружных территорий получила система питания от источника с глухозаземленной нейтралью трансформатора (система заземления *TN*). Согласно нормативным требованиям технических нормативных правовых актов [1, 2] основной обязательной мерой защиты от поражения электрическим током при косвенном прикосновении в таких электроустановках предусматривается автоматическое отключение питания. При гармонизации нормативной базы в этом вопросе и введении в действие, например, ГОСТ 30331.3-95 с аутентичным текстом международному стандарту МЭК 364-4-41-92 требование автоматического отключения было уточнено: «Защитное устройство, предназначенное для автоматического отключения питания цепи или элек-

трооборудования, должно обеспечивать защиту от косвенного прикосновения при замыкании токоведущей части на открытую проводящую часть или защитный проводник цепи или электрооборудования таким образом, чтобы время отключения питания обеспечивало электробезопасность человека при одновременном прикосновении к проводящим частям также в случае возможного превышения значений напряжения прикосновения 50 В переменного тока (действующее значение) и 120 В выпрямленного тока» [2]. С целью обеспечения электробезопасности человека нормируется, не только факт свершения отключения цепи питания, но и время этого процесса. Конкретные значения времени отключения зависят от системы заземления и напряжения цепи питания [1, 2].

В настоящем исследовании было рассмотрено нормативное время отключения не более 5 с, которое распространяется на распределительные электрические сети [1, 2]. Цель исследования определить соответствие или несоответствие требований к выбору модульных автоматических выключателей (МАВ) по критериям отключения при однофазном коротком замыкании (КЗ).

Временной критерий в соответствии с требованиями [1, 2] и международных стандартов определен выше. Альтернативным критерием выступает кратность однофазного тока короткого замыкания [1, 3], которая должна быть:

– не менее чем в 3 раза больше номинального тока нерегулируемого расцепителя, имеющего обратнозависимую от тока характеристику, т. е. теплового расцепителя автоматического выключателя;

– не менее чем в 1,1 раза больше уставки мгновенного срабатывания (отсечки) электромагнитного расцепителя с учетом возможного ее разброса.

В исследовании был проведен анализ время-токовых характеристик (ВТХ) 75 серий комбинированных МАВ от 50 различных производителей с характеристиками электромагнитного расцепителя B, C, D. В таблице 1 представлены результаты диапазонов времени срабатывания МАВ при 3-кратном превышении током КЗ номинального тока выключателя.

Таблица 1 – **Время срабатывания МАВ при трехкратном токе КЗ**

Характеристика электромагнитного расцепителя	Диапазон времени срабатывания теплового расцепителя, с	
	от	до
B	0,45	40,9
C	3,9	38,9
D	4,77	43,3

По данным таблицы 1 видно, что нормативное время 5 с входит в диапазон для всех рассмотренных МАВ, но значительно меньше значений верхних границ диапазонов, т. е. времени гарантированного срабатывания.

Для определения кратностей превышения тока КЗ номинальный ток теплового расцепителя МАВ, обеспечивающих гарантированное отключение аппаратов защиты, был произведен дополнительный анализ ВТХ, результаты которого сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – **Кратности тока КЗ к номинальному току теплового расцепителя для гарантированного автоматического отключения МАВ за время 5 с**

Характеристика эдектромагнитного расцепителя	Кратность для расцепителя		Процент отключения МАВ тепловым расцепителем
	теплового (средняя)	электромагнитного	
B	4,50	4,5; 4,7; 5	2,8
C	6,64	10	79,2
D	7,50	14; 16; 20	83,6

Численные значения кратности тока отключения при КЗ для теплового расцепителя из таблицы 2 не могут быть использованы на практике в связи с тем, что определяют гарантированное отключение только части МАВ за установленное время. Причем для МАВ с характеристикой B эта часть очень мала – всего около 3 %. Наглядно распределение кратности тока гарантированного автоматического отключения МАВ за время 5 с представлено гистограммами на рисунке 1.

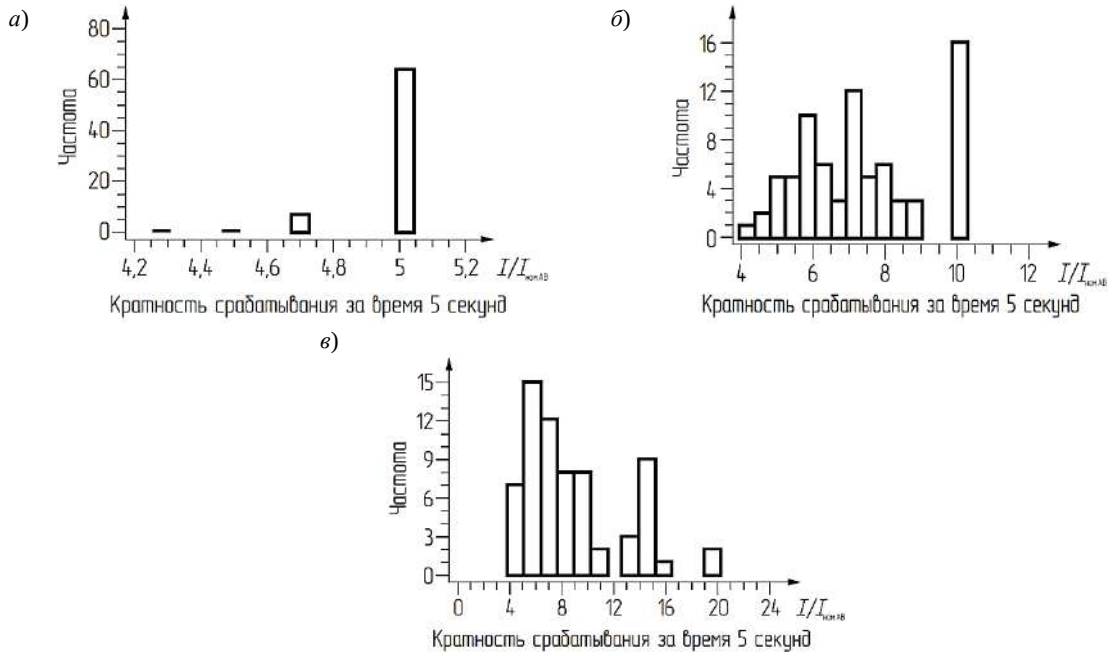


Рисунок 1 – Гистограммы кратностей автоматического отключения МАВ за время 5 с:
а – характеристика B; *б* – характеристика C; *в* – характеристика D

По гистограммам визуально видно, что исследуемая величина не имеет нормального закона распределения по причине наличия в комбинированном МАВ двух независимых друг от друга расцепителей. Это обусловливает возможность более раннего отключения теплового или электромагнитного расцепителя в зависимости от ВТХ конкретного выключателя. Поэтому для исследуемой случайной величины в качестве верхней границы доверительного интервала с вероятностью 95 % или выше целесообразно принять значение наибольшей кратности отключения МАВ с характеристиками B, C и D равными 5, 10 и 20 номиналов теплового расцепителя соответственно, что совпадает с наибольшими значениями гарантированного отключения электромагнитных расцепителей.

При замене в критерии выбора автоматического выключателя с кратности три [1] на значения, равные значениям гарантированного отключения электромагнитного расцепителя МАВ комбинированного типа, будут выполняться условия отключения за интервал времени менее 5 с (фактически будет гарантировано отключение за время менее 0,1 с [4]). Также будет выполняться критерий превышения уставки отсечки электромагнитного расцепителя «с учетом возможного её разброса» [1, 3]. При этом коэффициент запаса 1,1 для МАВ можно считать не актуальным, так как при их производстве осуществляется обязательная проверка качества, в том числе испытания гарантированного отключения электромагнитного расцепителя за время не более 0,1 с.

Список литературы

1 ТКП 339-2022 (33240). Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний – Взамен ТКП 339-2011 (02230); введ. 20.12.2022. – Минск, 2025. – 12 с.

2 ГОСТ 30331.3-95(МЭК 364-4-41-92). Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защита от поражения электрическим током. – Введ. 01.06.1999. – Минск : Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. – 15 с.

3 Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 648 с.: с ил.

4 ГОСТ IEC 60898-2-2021. Автоматические выключатели для защиты от сверхтоков бытового и аналогичного назначения. Ч. 2. – Введ. 01.03.2022. – М. : Рос. ин-т стандартизации, 2021. – 13 с.

УДК 629.4.027.2

ОПТИМИЗАЦИЯ СРОКОВ СЛУЖБЫ ПАССАЖИРСКИХ ТЕЛЕЖЕК НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

К. А. ЕМЕЛЬЯНОВА, Р. И. ЧЕРНИН, М. И. ПАСТУХОВ, П. М. АФАНАСЬКОВ, Е. Н. КОНОВАЛОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Безопасность движения поездов во многом определяется техническим состоянием подвижного состава и его составных элементов.

Тележка вагона является наиболее нагруженным элементом, подверженным интенсивным динамическим и усталостным воздействиям. Статистический анализ структуры списания пассажирских тележек на основе данных неразрушающего контроля и технической диагностики за многолетний период позволит оптимизировать межремонтные интервалы, что в перспективе снизит экономические затраты на эксплуатацию и ремонт, а также на основе полученного массива данных возможна реализация комплекса мероприятий по внедрению предиктивного подхода, который в последнее время широко используется в различных областях техники [1], при мониторинге тележек пассажирских вагонов.

В ходе ежегодного планового ремонта выполнялась комплексная диагностика. На основе полученных результатов тележки распределялись по трем категориям.

1 Пригодные к дальнейшей эксплуатации (с проведением ремонта или без него).

2 Подлежащие списанию по истечении назначенного срока службы.

3 Подлежащие досрочному списанию по критическому техническому состоянию (неремонтопригодные дефекты).

За анализируемый период суммарно было продиагностировано $N_{общ}$ = 2 218 единиц тележек различных годов постройки.

В таблице 1 представлены консолидированные данные по динамике технического состояния выборки.

Таблица 1 – **Данные по техническому состоянию выборки**

Год диагностики	Всего осмотрено, шт.	Списано, шт.		Доля брака по техническому состоянию, %
		по сроку службы	по техническому состоянию	
2020	542	31	45	8,3
2021	464	26	12	2,6
2022	272	39	23	8,4
2023	475	21	8	1,7
2024	247	34	5	2,0
2025	218	37	11	5,0
Итог	2 218	188	104	4,7

Представленная на рисунке 1 комбинированная диаграмма преобразует эмпирические данные в наглядные функциональные зависимости, позволяя осуществить сопряженный анализ количественных параметров, структуры выбытия и качественного состояния исследуемой выборки тележек. Интеграция линейного графика в поле гистограммы с накоплением обеспечивает дифференциацию между детерминированным процессом обновления основных фондов (плановое списание по истечении назначенного срока службы) и стохастическими потерями (досрочное списание по критическому техническому состоянию).

Визуализация экспериментального материала позволяет идентифицировать ключевую нелинейную закономерность: на фоне поступательного снижения абсолютных объемов диагностирования к 2025 году, деградационные процессы в структуре парка носят волнообразный характер. В то время как удельный вес планового выбытия элементов демонстрирует относительную временную стабильность, кривая неремонтопригодного брака характеризуется выраженной нестабильностью. Экстремумы данной кривой в 2020 и 2022 годах (>8 %) свидетельствуют о циклическом поступлении в ремонт субпопуляций подвижного состава с исчерпанным ресурсом надежности, тогда как глубокий минимум 2023–2024 годов (≤2 %) фиксирует интервал максимальной технологической устойчивости технических систем.

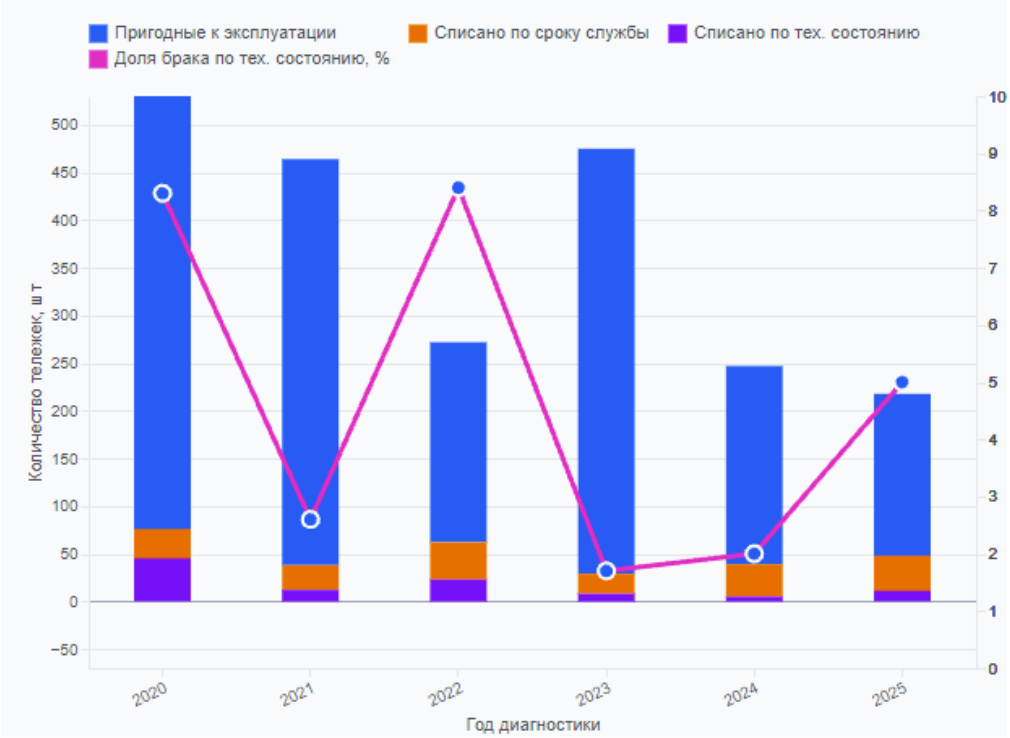


Рисунок 1 – Динамика результатов комплексной диагностики тележек

Анализ показал прямую корреляцию между годом постройки и причиной исключения из парка.

Тележки выпуска до 1983 года изымались преимущественно по нормативному сроку службы (достижение лимита в 42–45 лет).

Тележки выпуска 1983–1994 годов демонстрируют рост досрочного списания по техническому состоянию. В этой группе зафиксированы повышенная концентрация коррозионного износа поперечных и продольных балок рам тележек, а также коррозионный износ надрессорной балки (достигающий 50 %).

В качестве второго критерия наступления предельного состояния рам тележек принято появление трещин, не подлежащих устранению путем заварки, то есть с момента их выхода на основной металл конструкции.

Основными опасными местами конструкции рам тележек пассажирского вагона следует признать места соединения продольных и поперечных балок и места расположения отверстий на продольной балке для крепления страховочных устройств.

Основными опасными местами конструкции надрессорных балок следует признать места ромбовидных накладок в области соединения полок надрессорных балок с вертикальными ребрами жесткости, а также области сварных швов обечаек опорных поверхностей пружин рессорного подвешивания.

Полученные результаты обосновывают необходимость внедрения систем предиктивной диагностики на базе виброакустического контроля и тензометрического мониторинга. Это позволит выявлять зарождающиеся дефекты рамы до перехода их в категорию неремонтопригодных.

Все эти факторы обеспечивают техническую возможность безопасного увеличения межремонтного пробега. Внедрение предлагаемого подхода позволит оптимизировать жизненный цикл подвижного состава и снизить эксплуатационные расходы.

Список литературы

1 **Емельянова, К. А.** Применение предиктивной диагностики для железнодорожного подвижного состава и его элементов / К. А. Емельянова, Р. И. Чернин // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2025. – № 2 (51). – С. 36–38.

УДК 625.712

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

А. В. ЖОЛНЕРОВИЧ, Н. А. КОНДРАТЬЕВА
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

В современном мире новой ступенью развития транспортной инфраструктуры стал масштабный переход на цифровизацию и автоматизацию технологических процессов. Под беспилотными технологиями понимается «относительно новое направление совершенствования транспорта, подразумевающее автоматическое либо дистанционное управление движением транспортных средств и другими процессами, минимизируя участие человека с одновременным повышением производительности транспортных систем» [1]. В современном мире всё большую популярность набирают системы беспилотного управления. Использование таких систем позволяет автоматизировать различные процессы. Внедрение системы беспилотного управления в железнодорожный транспорт обеспечит решение комплекса задач: повышение безопасности, экономичности, надежности подвижного состава, а также точности соблюдения графика движения [1, 6].

Стандартом выделяется 4 уровня автоматизации поездов (Grade of Automation, GoA) [3, 8]:

– GoA1 (автоматизированное управление с машинистом): система контролирует безопасные ограничения скорости, но разгоном и торможением управляет человек;

– GoA2 (полуавтоматическое управление): разгон и остановка осуществляются автоматически, однако машинист находится в кабине для контроля препятствий и управления дверями;

– GoA3 (управление без машиниста): поезд движется полностью автоматически, но в салоне присутствует машинист-оператор для действий в чрезвычайных ситуациях;

– GoA4 (полностью беспилотное управление): полное отсутствие персонала на борту; все функции от диагностики до предотвращения столкновений выполняют автоматизированные комплексы и дистанционный центр управления.

Принцип работы систем автоведения железнодорожного состава включает сложный алгоритм взаимодействия модулей связи, центра управления, искусственный интеллект, GPS/ГЛОНАСС, датчиков пути, хранилища данных, а также тормозной и энергосистемы, системы мониторинга (рисунок 1).

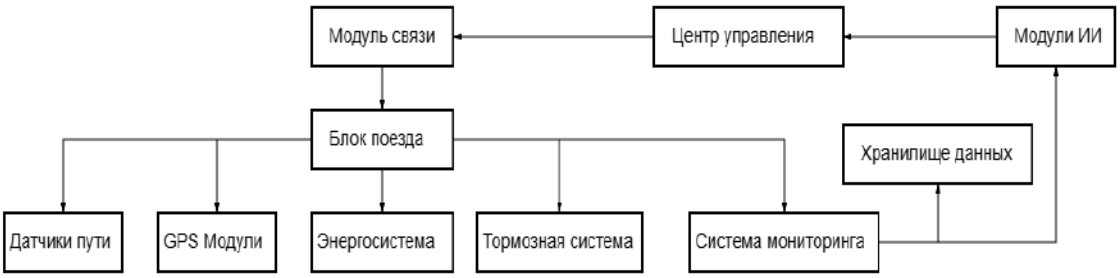


Рисунок 1 – Принцип работы систем автоведения

При возникновении нештатных ситуаций, таких как появление препятствий или повреждения инфраструктуры, использование алгоритмов искусственного интеллекта позволяет оперативно принимать решения для обеспечения безопсности движения состава. Для этого системе требуется «видеть» и анализировать обстановку на расстоянии, превышающем тормозной путь поезда, который составляет 300–1000 метров.

Решениям служат комплексные сенсорные системы: датчики LiDAR, оптические и тепловизионные камеры, радары миллиметрового диапазона [2]. Обработка поступающих данных производится с помощью сверхточных нейронных сетей (Convolutional Neural Networks, CNN). Алгоритмы фиксируют объекты на пути, предсказывают вектор их движения и принимают решение о необходимости экстренного или служебного применения торможения [1, 2].

Использование системы беспилотного управления увеличивает пропускную способность за счет улучшения координации движения и оптимизации расписания поездов, а также снижает возникновение ошибок и аварийных ситуаций.

Наиболее известные иностранные системы беспилотного управления – AutoHaul™ и Urbalis 400 CBTC [7]. Первая эксплуатируется для движения грузовых поездов, перевозящих железную руду в регионе Пилбара, Австралия. Система использует камеры, алгоритмы машинного обучения, искусственный интеллект, что позволяет поездам «видеть» препятствия и корректировать скорость и другие характеристики в зависимости от рельефа местности. Вторая система применяется в Сиднейском метрополитене, что позволило обеспечить полную автоматизацию движения поездов. Urbalis 400 CBTC позволяет поездам обмениваться информацией в реальном времени, а следовательно, изменять параметры так, чтобы предотвращать столкновения и минимизировать интервалы движения между поездами. Внедрение систем AutoHaul™ и Urbalis 400 CBTC повысило безопасность, эффективность и автоматизацию перевозок, снизило эксплуатационные затраты, предоставляя высокий уровень комфорта для пассажиров и надежность для операторов железнодорожных сетей.

В Беларуси в 2024 г. разработали и провели испытания беспилотного рельсового транспорта – 48-местного юнибуса U4-220 компании UST Inc [7]. Это беспилотник, где вместо машиниста функционирует автоматизированная система управления. Дополнительно ситуацию контролирует диспетчер. Юнибус также оснащен системами ABS/ASR, предотвращения столкновений, технического зрения и индивидуального спасения. Одно из главных качеств U4-220 – экономичность. Юнибус может перевозить пассажиров со скоростью до 150 км/ч. При этом расход энергии составляет около 32,5 кВт·ч/100 км.

Целесообразность внедрения систем беспилотного управления выступает приоритетным направлением развития железнодорожного транспорта [3, 5]. Применение современных алгоритмов автоведения, систем технического зрения и искусственного интеллекта позволяет оптимизировать графики движения, снизить удельный расход энергии и повысить безопасность перевозок [2, 4, 5]. Мировой опыт эксплуатации систем AutoHaul™ и Urbalis 400 [5, 7], а также отечественная разработка юнибуса U4-220 [7] подтверждают техническую и экономическую целесообразность перехода к полностью автономному рельсовому транспорту.

Список литературы

1 **Бочегов, М. А.** Искусственный интеллект на железной дороге / М. А. Бочегов // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8, № 3. – С. 34–41.

2 **Горбачев, Р. А.** Интеллектуальная система технического зрения для обнаружения препятствий и предсказания поведения движущихся объектов / Р. А. Горбачев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 5. – С. 112–118.

3 **Доценко, Ю. В.** Управленческие вызовы цифровизации железнодорожной отрасли: опыт внедрения ERTMS, RTC и ATO / Ю. В. Доценко // Евразийский союз ученых. – 2023. – № 4 (101). – С. 45–52.

4 **Жухин, Н. О.** Применение модели поезда для исследования работы системы автоведения / Н. О. Жухин // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2021. – Т. 80, № 4. – С. 210–217.

5 **Зелова, М. И.** Беспилотные технологии на транспорте. Перспективы развития / М. И. Зелова, А. В. Комаров // Молодая наука Сибири. – 2021. – № 2 (12). – URL: https://mnv.irgups.ru/toma/212-2021 (дата обращения: 10.08.2026).

6 **Козлов, В. Я.** Подходы к созданию интеллектуальных систем управления движением поездов / В. Я. Козлов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – № 2. – С. 201–209.

7 **Цзян Ди.** Беспилотные системы управления транспортом, опыт в железнодорожном транспорте = Unmanned transport control systems, experience in railway transport / Цзян Ди // Теория и практика современной науки. – 2024. – № 7 (109). – С. 86–91. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/bespilotnye-sistemy-upravleniya-transportom-opyt-v-zheleznodorozhnom-transporte (дата обращения: 18.08.2026).

8 IEC 62290-1:2025. Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems – Part 1: System principles and fundamental concepts. – Ed. 3.0. – Geneva : IEC, 2025. – URL: https://iec.ch (дата обращения: 07.09.2026).

УДК 006.015.8:625.1

ОСОБЕННОСТИ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ПРОДУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

В. С. ЗАЙЧИК, А. А. КЕБИКОВ, Н. М. ПЕРЕКРЕСТОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Согласно законодательным актам, действующим на территории Евразийского экономического союза (далее – ЕАЭС), для установления конкретных технических требований при подтверждении соответствия железнодорожной продукции используются перечни международных и региональных (межгосударственных) стандартов, а в случае их отсутствия – национальных (государственных) стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований технических регламентов [1–3]. Применение данных перечней позволяет установить гармонизированные, прозрачные для всех сторон процесса требования, что обеспечивает равный беспристрастный подход ко всем заявителям во всех органах по сертификации на территории ЕАЭС и безусловно обеспечить безопасность железнодорожной продукции. Вместе с тем при практическом применении возникает ситуация, когда поставляемая инновационная продукция отличается по своим параметрам от установленных в [1–3] требований и оценка ее соответствия не может быть проведена с использованием существующих значений показателей.

Для решения данной проблемы техническими регламентами ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава», ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» и ТР ТС 003/2011 «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» [4–6] предусматривается механизм использования обоснования безопасности, в котором на основании анализа рисков устанавливаются требования отличные от указанных в технических нормативных правовых актах (далее – ТНПА), приведенных в [1–3].

Процедура анализа рисков применяется при проведении работ по сертификации или декларированию железнодорожной продукции в следующих случаях:

– неприменение либо неполное применение положений ТНПА, включенных в [1–3];

– внесение изменений либо новых редакций ТНПА, включенных в [1–3], если данные изменения либо новые редакции имеют новую структуру, влияющую на номенклатуру показателей;

– до введения в действие [1–3] по отдельным видам продукции.

Для применения процедуры заявитель вместе с заявкой должен предоставить в орган по сертификации обоснование безопасности по [7], которое должно содержать, в частности, следующие разделы:

– описание и область применения продукции;

– требования к продукции, которые установлены ТНПА, включенными в [1–3], и обоснование необходимости их изменения и/или неприменения;

– новые требования к продукции, которые применяются либо заменяют требования к продукции, установленные ТНПА, включенными в [1–3];

– анализ рисков применения новых требований, выполненный в соответствии с ТНПА в данной области;

– выводы о возможности применения либо неприменения новых требований к продукции.

При необходимости обоснование безопасности может включать в себя дополнительные разделы, а также приложения, содержащие справочную и иную информацию, необходимую, по мнению разработчика обоснования безопасности, для анализа рисков.

Изменение методов проведения испытаний в отношении продукции, для которой осуществляется подтверждение соответствия по [4–6], посредством обоснования безопасности не допускается. Испытания продукции по показателям, указанным в обосновании безопасности, проводятся в аккредитованных испытательных лабораториях (центрах), имеющих в своей области аккредитации методы, которые позволяют подтвердить соответствие установленным требованиям.

Обоснование безопасности должно быть утверждено разработчиком и в обязательном порядке согласовано с железнодорожной администрацией либо профильным министерством, которые осуществляют эксплуатацию указанной продукции на колее 1520 мм. Допускается согласование обоснования безопасности структурными подразделениями указанных организаций. Обоснование

безопасности, не имеющее гриф согласования, не рассматривается и для целей подтверждения соответствия не применяется.

После получения обоснования безопасности орган по сертификации рассматривает и выносит решение по сертификации с учетом изменения показателей безопасности, указанных в обосновании. При необходимости орган по сертификации может направить обоснование безопасности на экспертизу специализированной организации, имеющей соответствующую компетенцию для рассмотрения, в том числе испытательному центру (лаборатории), который имеет в своей области аккредитации сертифицируемую продукцию. В этом случае орган по сертификации обязан известить заявителя об увеличении сроков рассмотрения заявки. Основаниями для отклонения обоснования безопасности являются:

– невозможностью применить обоснование безопасности к продукции, в отношении которой осуществляется оценка соответствия;

– оформление обоснования безопасности с нарушением установленных правил;

– отсутствие либо некорректное описание в обосновании безопасности анализа рисков;

– отсутствие в обосновании полного перечня рисков и их анализа;

– отсутствие согласования обоснования безопасности.

В общем случае допускается предоставлять обоснование безопасности в ходе проведения работ по сертификации по процедуре внесения изменений в заявку. При поступлении обоснования безопасности после принятия решения по заявке орган по сертификации по результатам рассмотрения либо отклоняет применение обоснования безопасности, либо вносит изменения в решение по заявке.

Остальные процедуры подтверждения соответствия проводятся в порядке, установленном техническими регламентами, в соответствии со схемами подтверждения соответствия.

Указанный порядок выработался исходя из практического применения органами по сертификации на территории ЕАЭС и в настоящее время он проходит документальное оформлением в виде разрабатываемых Евразийской экономической комиссией рекомендаций по данному вопросу.

Список литературы

1 Перечень Международных и региональных (межгосударственных) стандартов, а в случае их отсутствия – национальных (государственных) стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Технического регламента таможенного союза ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава» – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2024. – 203 с.

2 Перечень Международных и региональных (межгосударственных) стандартов, а в случае их отсутствия – национальных (государственных) стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Технического регламента таможенного союза ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2024. – 75 с.

3 Перечень Международных и региональных (межгосударственных) стандартов, а в случае их отсутствия – национальных (государственных) стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Технического регламента таможенного союза ТР ТС 003/2011 «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2024. – 23 с.

4 ТР ТС 001/2011. О безопасности железнодорожного подвижного состава / Евразийская экономическая комиссия. – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2022. – 49 с.

5 ТР ТС 003/2011. О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта / Евразийская экономическая комиссия. – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2022. – 37 с.

6 ТР ТС 002/2011. О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта / Евразийская экономическая комиссия. – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2022. – 55 с.

7 ГОСТ 34008-2016. Железнодорожная техника. Правила подготовки обоснования безопасности. – Минск : Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2016. – 15 с.

УДК 621.833:629.4

ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПРИВОДОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Г. Д. ЗАХАРОВА

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

Зубчатые передачи являются неотъемлемым элементом тяговых приводов локомотивов, моторвагонного подвижного состава и вспомогательных агрегатов. Наряду с передачей крутящего

момента они выступают одним из основных источников структурной вибрации и шума. Виброакустическая активность передач влияет одновременно на несколько групп требований: акустический комфорт пассажиров и обслуживающего персонала, санитарно-гигиенические нормы по внешнему шуму, надёжность и ресурс элементов привода, а также диагностическое состояние узла [1]. При этом указанные требования нередко вступают в противоречие: решения, снижающие шум, могут повышать стоимость изготовления или сказываться на несущей способности, что делает задачу многокритериальной уже на этапе постановки.

Особенности динамического нагружения железнодорожного подвижного состава состоят в сочетании высоких постоянных и переменных нагрузок, широкого диапазона частот вращения зубчатых колёс приводов, наличии реверсивных режимов, ударных воздействий со стороны пути и работы привода в составе динамической системы «подвижной состав – путь», что отличает задачу от «классической» виброакустики редукторов общего машиностроения и требует учёта эксплуатационной специфики. В отличие от стационарных промышленных редукторов, работающих преимущественно в установившихся режимах, тяговый привод постоянно функционирует в переходных процессах разгона и торможения, при переменных внешних воздействиях и в условиях, когда частота возбуждения непрерывно проходит через собственные частоты конструкции, что приводит к частым резонансным явлениям и существенной нестационарности виброакустического отклика.

Цель представленной работы – выполнить анализ механизмов возбуждения виброакустических нагрузок в зубчатых передачах приводов подвижного состава и предложить методы их снижения на основе систематизации современных представлений о природе, механизмах возбуждения и методах снижения виброакустических нагрузок зубчатых передач тяговых и вспомогательных приводов железнодорожного подвижного состава.

Ключевым внутренним источником возбуждения признаётся погрешность зацепления (transmission error, TE) – отклонение фактического углового положения ведомого колеса от идеального кинематического [2]. Различают геометрическую (обусловленную профильными и шаговыми погрешностями) и упругую (обусловленную деформацией зубьев под нагрузкой) составляющие. Геометрическая составляющая проявляется практически независимо от уровня нагрузки и определяется точностью изготовления, тогда как упругая составляющая растёт с увеличением передаваемого момента и связана с податливостью зубьев и контактными деформациями. Переменная во времени погрешность зацепления формирует динамическую силу в зацеплении на зубцовой частоте и её гармониках. Именно поэтому минимизацию TE обычно проводят для конкретного рабочего диапазона моментов: модификация, оптимальная при номинальной нагрузке, может оказаться неэффективной на частичных режимах.

При пересопряжении зубьев меняется число пар, находящихся в контакте, что приводит к периодическому изменению суммарной жёсткости зацепления. Параметрическое возбуждение, связанное с этой переменной жесткостью, является одним из основных механизмов генерации вибрации независимо от геометрии зубьев. При входе и выходе зубьев из зацепления, а также при недостаточной модификации профиля возникает кромочный контакт, сопровождающийся ударными импульсами, который резко расширяет спектр возбуждения в высокочастотную область и повышает уровень излучаемого шума. Ударная природа кромочного контакта делает его особенно значимым источником высокочастотного шума, поскольку короткие импульсы содержат энергию в широкой полосе частот и легко возбуждают высшие моды корпусных деталей.

Отклонения при изготовлении (погрешности профиля, шага, направления зуба, биение), дефекты сборки (перекосы, несоосность) и эксплуатационные повреждения (питтинг, износ, выкрашивание, сколы) формируют характерные спектральные признаки. Локальные дефекты, как правило, проявляются в виде периодических ударных откликов с частотой, кратной частоте вращения повреждённого колеса, и сопровождаются ростом боковых полос (модуляцией) вокруг зубцовых гармоник, тогда как распределённые дефекты (общий износ, ошибки шага) изменяют уровень и форму огибающей спектра.

Виброакустические нагрузки приводов на железнодорожном подвижном составе определяются не только внутренними свойствами передачи, но и внешними динамическими воздействиями. В режимах тяги, торможения и реверса резкие изменения момента приводят к переходным процессам, перераспределению нагрузки между зубьями и возможному размыканию контакта. При малых нагрузках и наличии бокового зазора возможны повторные соударения зубьев, генерирующие интен-

сивный ударный шум, а смена знака момента при реверсе сопровождается переходом контакта на нерабочую сторону зуба, что также является источником дополнительных динамических нагрузок.

Неровности пути, стыки, стрелочные переводы и волнообразный износ рельсов создают широкополосное возбуждение, передающееся через колёсно-моторный блок в зацепление. Продольные динамические усилия при трогании, торможении и колебаниях состава накладываются на нагрузку привода, что важно учитывать при оценке усталостной прочности и ресурса. Опорно-осевое либо опорно-рамное подвешивание тягового двигателя, тип и жёсткость упругих муфт, характеристики подвешивания существенно меняют виброакустический отклик узла. В итоге зубчатая передача рассматривается не изолированно, а как элемент связанной динамической системы экипажа, и её виброакустические характеристики нельзя корректно оценить в отрыве от компоновки и параметров подвешивания привода.

Оценка шума требует моделирования всей цепочки «возбуждение – структурная вибрация корпуса/картера – излучение шума». Для расчёта излучения применяются методы граничных элементов (BEM) и статистического энергетического анализа (SEA), связываемые с результатами структурного динамического расчёта. При этом BEM целесообразен в области низких и средних частот, где важен детальный учёт формы излучающих поверхностей, а SEA эффективен в высокочастотной области с высокой модальной плотностью, где детерминированные методы становятся вычислительно затратными и чувствительными к неопределённостям. В качестве интегральных показателей используются уровни виброускорения/виброскорости, уровни звукового давления и мощности, порядковые спектры (order tracking), а также амплитуды пиков на зубцовой частоте и её гармониках.

Несмотря на значительный объём исследований, остаются актуальными следующие направления: совместный учёт внутренних источников возбуждения и внешних воздействий пути в единой связанной модели «привод – подвижной состав – путь»; прогнозирование эволюции виброакустических характеристик по мере накопления износа и развития дефектов; многокритериальная оптимизация модификаций зубьев одновременно по шуму, вибрации, несущей способности и ресурсу; развитие методов виброакустической диагностики и мониторинга состояния приводов в эксплуатации; увязка виброакустических нагрузок с оценкой усталостной прочности и остаточного ресурса элементов привода.

Таким образом, виброакустические нагрузки зубчатых передач приводов подвижного состава формируются совместным действием внутренних источников возбуждения зацепления и внешних воздействий, возникающих в процессе эксплуатации подвижного состава. Наиболее перспективным способом снижения виброакустической нагрузки на приводы железнодорожного транспорта представляется системный подход, объединяющий расчётное моделирование полной виброакустической цепочки, экспериментальную верификацию и увязку с оценкой прочности и ресурса привода.

Список литературы

1 **Бутенко, М. П.** Классификация источников шума железнодорожного транспорта и инфраструктуры / М. П. Бутенко // Экономика строительства. – 2026. – № 3. – С. 712–716.

2 **Медведев, А. М.** Виброакустические исследования зубчатой передачи с демпфированием / А. М. Медведев, Г. В. Литовка, Е. С. Кишлалы // iPolytech Journal. – 2006. – Т. 4, № 4 (28). – С. 27–30.

УДК 629.4

О МЕТОДАХ РАСЧЁТА ОСТАНОВОЧНЫХ ПУТЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ЖЕЛЕЗОДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ЭКСПЕРТИЗАХ

А. В. ИСАЕВ, А. С. ПОЛЯКОВА, О. Н. ХУДЯКОВА
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация

В настоящее время традиционными для транспортной науки являются методы тормозных расчётов, изложенные в «Правилах тяговых расчётов для поездной работы» [1, 2] и в «Правилах технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава» [3]. Однако с формальной точки зрения производить тормозные расчёты для иных видов рельсового транспорта (городской внеуличный – метрополитен и легкорельсовый –

трамвай) недопустимо. Помимо этого, в [1–3] предусматривается расчёт лишь тормозного пути – но не остановочного, включающего в себя и время реакции лица, управляющего подвижным составом. Применение же расчётов по таблицам, указанным в [3], на практике не всегда может привести к верному результату из-за неполноты таковых.

Под остановочным путём $S_о$ понимается расстояние, проходимое поездом за время обнаружения машинистом препятствия до полной остановки [4, с. 17],

$$S_о = S_в + S_п + S_д, \quad (1)$$

где $S_в$ – путь восприятия; $S_п$ – путь подготовки тормозов; $S_д$ – действительный тормозной путь. В практических расчётах под тормозным путём $S_т$ понимается сумма пути подготовки тормозов и действительного тормозного пути:

$$S_т = S_п + S_д. \quad (2)$$

Путь восприятия [5]

$$S_в = 0{,}278\, v_в\, t_в, \quad (3)$$

где 0,278 – переводной коэффициент; $v_в$ – начальная скорость, км/ч; $t_в$ – время восприятия, с.

Расчёты и опыты показывают возможность получения удовлетворительных для практики результатов при использовании в качестве начальной скорости – значения скорости, при которой машинист поставил ручку крана машиниста в положение экстренного торможения. Значение же времени восприятия лежит в диапазоне 3–5 с [5].

Суть расчёта тормозного пути заключается в интегрировании хорошо известного уравнения движения поезда. Однако тормозная сила и основное сопротивление движению поезда также являются функциями скорости, из-за чего интегрирование уравнения движения вызывает определённые сложности [6]. Поэтому до 1960-х гг. на отечественных железных дорогах как при тяговых, так и при тормозных расчётах применялся графический метод, предложенный инженером А. И. Липецом и описанный в трудах Ю. В. Ломоносова [7]. Ученик Ю. В. Ломоносова В. Ф. Егорченко также использовал данный способ, называя его «классическим» [8, с. 128] (иногда называется способом МПС – *прим. авт*).

24 апреля 1961 г. ЦЗ П.Г. Муратовым были утверждены Правила тяговых расчётов для поездной работы, в которых содержались номограммы тормозных путей пассажирских и грузовых поездов на спусках различной крутизны в зависимости от величины расчётного тормозного коэффициента для различных начальных скоростей торможения [9]. В 1962 г. ЦНИИ МПС было выпущено издание «Методы тормозных расчётов», где, по сути, впервые в практике отечественных железных дорог была предложена методика расчётов по четырём методам: аналитическому, по номограммам, графическому и методу численного интегрирования по интервалам времени [10]. В 1969 г. П. Т. Гребенюком и Е. В. Клыковым была издана брошюра «Тормозные расчёты подвижного состава», где методика была несколько изменена. Аналитический метод теперь включал в себя три метода: расчёт численным интегрированием по интервалам скорости, расчёт интегрированием уравнения движения при установившемся торможении и расчёт численным интегрированием по интервалам времени. Практически неизменными в методике осталось изложение графического метода и метода расчёта по номограммам. Все указанные методы применяются по сей день и достаточно подробно изложены в учебной литературе [11, 12].

Однако при расчётах по номограммам необходимо учитывать следующее.

1 Номограммы рассчитаны для поездов длиной до 200 осей. Если длина поезда превышает указанное значение – то путь подготовки тормозов будет определяться по другим зависимостям, соответственно, тормозной путь увеличится, и расчёты надлежит вести иными методами (графическим или аналитическим). В случае, когда расчётчик не владеет указанными методами, то возможно при расчётах уменьшать силы нажатия на 10 %, т. е. на величину, показывающую, на сколько действие силы нажатия тормозных колодок в длинном поезде (более 200 осей) меньше, чем в коротком [10, с. 13].

2 Номограммы рассчитаны лишь для «площадки» и спуска. В случае, если торможение происходит на подъёме, надлежит использовать метод, изложенный в [13, с. 83, 94, 97]. При данном методе тормозной путь на подъёме определяется как

$$S_т = 2S_{площ} + S_{спуск}, \quad (4)$$

где $S_{площ}$ – тормозной путь поезда на «площадке», определяемый по номограммам (таблицам), $S_{спуск}$ – тормозной путь на спуске того же значения, что и подъём, также определяемый по номограммам (таблицам).

З В случае использования таблиц, приведённых в [3], и нахождении значений силы нажатия, скорости и уклона между табличными значениями, некоторые авторы рекомендуют применять метод линейной интерполяции [12]. Однако этот метод применим лишь при нахождении какого-то одного параметра из трёх между табличными значениями; в случае, когда между табличными значениями находятся два или три параметра, следует применять многомерную (билинейную и трилинейную) интерполяцию либо же использовать графический или аналитический метод.

Список литературы

1 Правила тяговых расчётов для поездной работы : утв. ЦЗ Ф. И. Шулешко 15.08.1980 г. – М. : Транспорт, 1985. – 289 с.

2 Правила тяговых расчетов для поездной работы : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 26.12.2024 № 3322/р. – М., 2025. – 690 с.

3 Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : утв. Советом по ж.-д. трансп. государств – участников Содружества (протокол № 83 от 25–26.11.2025 г.). – М., 2026. – 227 с.

4 **Исаев, А. В.** Словарь терминов, сокращений, условных телеграфных адресов, учётных форм, железнодорожного слэнга для железнодорожно-транспортных экспертов / А. В. Исаев, А. С. Полякова, О. Н. Худякова. – М.: СУДЭКС, 2026. – 63 с.

5 **Исаев, А. В.** Анализ действий машиниста при транспортном событии / А. В. Исаев, С. Л. Вершинин // Локомотив. – 2017. – № 4. – С. 5.

6 **Иноземцев, В. Г.** Автоматичнские тормоза : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В. Г. Иноземцев, В. М. Казаринов, В. Ф. Ясенцев. – М. : Транспорт, 1981. – 464 с.

7 **Ломоносов, Ю. В.** Тяговые расчёты / Ю. В. Ломоносов. – Берлин : Бюро иностранной науки и техники, 1922. – 298 с.

8 **Егорченко, В. Ф.** Тяговые расчёты. Практическое руководство / В. Ф. Егорченко. – М. : Транспечать НКПС, 1929. – 211 с.

9 **Казаринов, В. М.** Методы тормозных расчётов / В. М. Казаринов, П. Т. Гребенок, Е. В. Клыков. – М. : Трансжелдориздат, 1961. – 97 с.

10 **Гребенюк П. Т.** Тормозные расчёты подвижного состава / П. Т. Гребенюк, Е. В. Клыков. – М. : Транспорт, 1969. – 72 с.

11 **Деев, В. В.** Тяга поездов : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / В. В. Деев, Г. А. Ильин, Г. С. Афонин. – М. : Транспорт, 1987. – 264 с.

12 **Бахолдин, В. И.** Основы локомотивной тяги : учеб. пособие / В. И. Бахолдин, Г. С. Афонин, Д. Н. Курилкин. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп., 2014. – 308 с.

13 **Гребенюк, П. Т.** Тяговые расчёты : справ. / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, А. Н. Скворцова. – М. : Транспорт, 1987. – 272 с.

УДК 629.4.077-592

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТОРМОЗАМИ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДОВ СЕРИЙ ДР1А, ДР1Б ПРИ СЛЕДОВАНИИ СО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ ЛОКОМОТИВОМ

А. В. КОЛЕНЧИКОВ, П. К. РУДОВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Основные объемы перевозок на сети ГО «Белорусская железная дорога» (БелЖД) сосредоточены в грузовом движении. Значительно меньшая их часть приходится на пассажирское движение (внутреннее и международное) и пригородное (местное).

Пригородные перевозки на БелЖД осуществляются поездами формата региональных линий, где преимущественно эксплуатируется моторвагонный подвижной состав (МВПС). На малодеятельных участках для перевозки пассажиров используют поезда, сформированные из вагонов локомотивной тяги. Основные серии МВПС, находящиеся в регулярной эксплуатации, представлены дизель-поездами ДР1А, ДР1Б, МДП (ДР1Л), дизель-поездами локомотивной тяги (с тяговыми секциями тепловозов серий 2М62, 2М62У) ДРБ-1, ДДБ-1, рельсовым автобусом ДП1 и электропоездами ЭР9М, ЭР9Е, ЭР9Т, ЭР9ТМ, ЭПг (городской электропоезд). Распределение парка МВПС по локомотивным (оборотным) депо БелЖД приведено в таблице 1.

Таблица 1 – **Распределение МВПС по локомотивным (оборотным) депо БелЖД**

Локомотивное депо / оборотное локомотивное депо	Серия									
	дизель-поезда						электропоезда			
	ДР1А	ДР1Б	МДП (ДР1Л)	ДРБ-1	ДДБ-1	ДП1	ЭР9М	ЭР9Е	ЭР9Т, ЭР9ТМ	ЭПг
ТЧ-3 Барановичи	+	–	–	–	–	–	+	+	–	–
ТЧ-5 Лида	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–
ТЧ-7 Брест	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ТЧ-8 Гомель	+	+	–	–	–	–	–	+	–	–
ТД-11 Калинковичи	–	–	–	–	–	+	–	–	–	–
ТЧ-9 Минск-Северный	–	–	–	–	–	–	+	–	+	+
ТЧ-12 Могилёв	–	–	–	+	–	+	–	–	–	–
ТЧ-15 Орша	–	–	–	+	+	–	–	–	–	–
ТД-17 Полоцк	–	–	–	–	+	–	–	–	–	–

Инвентарный парк МВПС БелЖД большей его частью представлен дизель-поездами. Это обусловлено тем, что неэлектрифицированные участки составляют 75 % от общей протяженности дороги.

Эксплуатируемый парк дизель-поездов многообразен, каждая серия имеет свои конструктивные особенности. Различия по типам применяемых тормозов приведены в таблице 2. По способу приведения тормозов в действие все дизель-поезда оснащены электропневматическим (основным) и пневматическим тормозом (резервным).

Таблица 2 – **Тип тормоза по конструкции эксплуатируемых дизель-поездов**

ДР1А	ДР1Б	МДП (ДР1Л)	ДРБ-1 2М62	ДРБ-1 2М62У	ДДБ-1 2М62	ДДБ-1 2М62У
Дисковый	Дисковый	Дисковый	Дисковый	Дисковый	Колодочный с двухсторонним нажатием ТК	Колодочный с двухсторонним нажатием ТК
			Колодочный с односторонним нажатием ТК*	Колодочный с двухсторонним нажатием ТК*	Колодочный с односторонним нажатием ТК*	Колодочный с двухсторонним нажатием ТК*
* Для указанной тяговой секции локомотива. *Примечание* – ТК – тормозная колодка.						

Наибольшая часть их парка состоит из дизель-поездов серии ДР1А. Они оборудованы дисковым тормозом, приводимым в действие основным электропневматическим тормозом. В последние время у дизель-поездов этой серии, а также серии ДР1Б (тормозная система идентична серии ДР1А) наблюдаются случаи отказов в процессе выполнения перевозочного процесса в пригородном сообщении. В таком случае возникает необходимость дальнейшего следования со вспомогательным локомотивом, как это показано на рисунке 1.



Рисунок 1 – Следование дизель-поезда ДР1Б со вспомогательным локомотивом М62УК

Вспомогательный локомотив может быть затребован локомотивной бригадой в пути следования или дежурным по депо, когда не обеспечивается возможность выдачи исправного дизель-поезда из депо. При следовании со вспомогательным локомотивом возможность управления электропневматическим тормозом дизель-поезда отсутствует даже в том случае, если локомотив оборудован этим видом тормоза (например, тепловоз серии ТЭП70). Это связано с тем, что на локомотиве и вагонах дизель-поезда используют различные виды электропневматического тормоза по количеству линейных проводов. При выполнении торможений пневматическими тормозами зачастую в составе возникают динамические реакции, выраженные в виде продольных толчков и ударов, что негативно сказывается на комфорте и безопасности пассажиров и приводит к увеличению нагруженности узлов и деталей дизель-поезда.

Также одной из причин возникновения продольно-динамических сил является различие тормозных систем – использование дисковых тормозов с композиционными накладками на дизель-поездах и колодочных тормозов с чугунными колодками на локомотивах. Фрикционные характеристики композиционных накладок и чугунных колодок имеют существенные отличия, особенно по зависимости коэффициента трения от скорости. Коэффициент трения чугунных колодок при высоких скоростях движения низкий и резко возрастает с уменьшением скорости движения, а коэффициент трения композиционных накладок является более стабильным и изменяется в небольших пределах. Поэтому удельная тормозная сила вспомогательного локомотива и дизель-поезда может различаться в значительной степени, и это различие изменяется со снижением скорости в процессе торможения. При следовании в диапазоне высоких скоростей движения удельная тормозная сила дизель-поезда будет больше, а в зоне низких скоростей движения – у вспомогательного локомотива. В результате поезд будет переходить из первоначально растянутого состояния в сжатое. Из-за этого даже при регулировочном торможении в составе дизель-поезда возникают продольно-динамические силы. Для улучшения продольной динамики регулировочные и остановочные торможения дизель-поездов желательно производить небольшими ступенями торможения. Если на вспомогательном локомотиве имеется возможность отпуска автоматического тормоза при заторможенном составе, то по мере снижения скорости, а также увеличении ступени торможения необходимо ступенями отпускать тормоз локомотива, не превышая определенную величину давления в тормозных цилиндрах. Управление тормозами дизель-поезда со вспомогательного локомотива должно осуществляться с учетом типа локомотива (его массы, особенностей тормозной системы), начальной и текущей скорости движения.

Для выработки рекомендаций по управлению тормозами необходимо проведение теоретических исследований с дальнейшим их подтверждением на практике.

Список литературы

1 **Рудов, П. К.** Улучшение продольной динамики дизель-поезда ДДБ1 при торможении / П. К. Рудов // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2007. – № 1–2 (14–15). – С. 129–132.

2 **Галай, Э. И.** Снижение продольных динамических усилий при торможении дизель-поезда ДДБ1 / Э. И. Галай, П. К. Рудов, Е. А. Кожевников // Наука, инновации и образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 16–17 ноября 2006 г. / Уральский гос. ун-т путей сообщ. ; под общ. ред. В. М. Сай. – Екатеринбург, 2006. – С. 126–127.

3 **Рудов, П. К.** Рациональные параметры тормозных систем дизель-поездов с учётом изменения их характеристик при эксплуатации : дис. … канд. техн. наук : 05.22.07 / Рудов Павел Корнеевич ; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель, 2007. – 223 л.

УДК 62-214

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОЖУХА ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОВОЗА

Д. А. КОЛОТАЙ
Дирекция по операционной деятельности АО «Трансмашхолдинг»,
г. Москва, Российская Федерация

А. Г. АНДРИЕВСКИЙ, Е. А. ЧАБАН
Красноярский институт железнодорожного транспорта –
филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, Российская Федерация

Кожух зубчатой передачи работает в условиях действия тяжелейших механических факторов, присущих транспортным системам. Потеря работоспособности КЗП, как правило, происходит в холодный период времени года и является циклическим повторяющимся отказом [1], нанося урон ожидаемой (запланированной) эффективности использования электровозов. Непосредственной причиной нарушения безопасности движения поездов может являться опускание нижней части КЗП с противоколлекторной стороны колесно-моторного блока локомотива за нижний габарит подвижного состава с последующим воздействием на элементы верхнего строения железнодорожного пути вследствие выкручивания болта крепления нижней части КЗП. Согласно данным отчета локомотивного хозяйства ОАО «РЖД» за период 2025 года количество выявленных отказов КЗП составило 20 % от всех установленных на электровозах парка Восточного полигона. Таким образом КЗП является одним из наиболее часто повреждаемых элементов механической части локомотива [2, 3].

КЗП является сварно-сборочной емкостью, охватывающей зубчатую пару (рисунок 1), которая выполняет функцию защиты зубчатых колес от внешних воздействий, при этом нижняя разъемная часть кожуха используется как резервуар для размещения запаса смазочного масла [1].

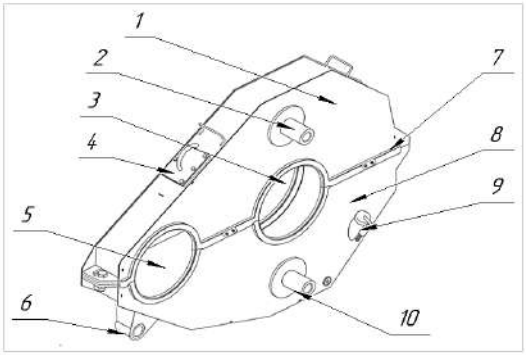


Рисунок 1 – Кожух зубчатой передачи:
1, 8 – верхняя и нижняя половины; *2, 10* – бобышки крепления; *3* – посадочное место оси колесной пары; *4* – трубка сапун; *5* – посадочное место вала ТЭД; *6* – втулка болта подвески КЗП; *7* – болты сочленения; *9* – заправочная горловина

Основные повреждения КЗП, возникающие при эксплуатации локомотива (рисунок 2): обрыв полукольца по сварному шву большой и малой горловин, излом скобы крепления кожуха, трещины в сварных швах и основном металле стенки кожуха; трещины и пробои желоба кожуха, трещины и обрыв кронштейна крепления кожуха. Более 80 % повреждений выявляются в виде трещин в сварных швах, основном металле стенки и других элементах кожуха. При этом механические повреждения корпуса КЗП часто возникают при отсутствии следов удара, что свидетельствует об их усталостном характере происхождения.

а) *б)* *в)*



Рисунок 2 – Выявляемые повреждения КЗП:
а – трещины в местах крепления; *б* – неплотное прилегание гравёрных шайб; *в* – трещины по сварным швам

В качестве одной из причин разрушения корпуса КЗП рассматривается применяемая при экипировке смазка ОС-(Л, З) ТУ 0254-001-65561489-2013, в состав которой входит 80 % парафина и заправляется в КЗП в разогретом состоянии при 60 °С. При эксплуатации электровоза происходит напрессовка используемой смазки между внутренними стенками кожуха и шестернями редуктора, что приводит к возникновению деформации стенок кожуха (рисунок 3). Деформация (выдавливание) боковых стенок половин КЗП приводит к нарушению соосности элементов нижней и верхней половин КЗП и потере эффективности применяемого войлочного уплотнения, что способствует вытеканию смазки на ж.-д. путь и приводит к дальнейшему масляному голоданию косозубой передачи, вибрации КМБ, ослаблению крепления КЗП к остову тягового двигателя и выкручиванию соединительных элементов крепления верхней и нижней половин КЗП [2, 3].



Рисунок 3 – Деформация боковых стенок КЗП вследствие напрессовки используемой смазки

В качестве одного из возможных путей решения проблемы предлагается замена смазки (ОС-Л, З) ТУ-0254-082-70351853-2015 на трансмиссионное синтетическое масло Mobil Delvac 1 Gear Oil 75w90 API GL-5/MT-1, которое обеспечивает защиту зубчатой передачи от износа, коррозии и термического разложения, что критически важно для механической части транспортных средств, эксплуатируемых в условиях резкоконтинентального климата. Предлагаемое для использования синтетическое масло не требует подогрева при экипировке КЗП, не подвержено загустению и налипанию на внутренние части кожуха при низких температурах в эксплуатации, постоянно находится в жидкой форме. При этом уровень имеющегося масла в нижней половине КЗП можно контролировать при помощи

смотрового окна и специально разработанного датчика, что значительно сэкономит сервисным компаниям трудозатраты на экипировку и обслуживание при ремонтах.

Список литературы

1 **Андриевский, А. Г.** Влияние сезонного фактора на возникновение отказов кожухов тяговой зубчатой передачи электровозов ВЛ80 / А. Г. Андриевский, Е. А. Чабан // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2017. – Т. 2. – С. 405–410.

2 **Андриевский, А. Г.** Влияние на прочность кожуха зубчатой передачи электровоза условий его закрепления / А. Г. Андриевский, Е. А. Чабан // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем : материалы и доклады, Красноярск, 16–20 октября 2023 года. – Красноярск : Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 2023. – С. 99–102.

3 **Андриевский, А. Г**. Оценка долговечности и рациональное крепление кожуха зубчатой передачи к тяговому двигателю электровоза / А. Г. Андриевский, Е. А. Чабан, В. В. Москвичев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 2. – С. 182–192.

УДК 629.4.027:539.431

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ФАКТИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ТРАМВАЙНЫХ ОСЕЙ

В. В. КОМИССАРОВ, А. С. ЛАПУШКИН
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Разработана и апробирована расчетно-экспериментальная методика определения усталостной прочности натурных осей подвижного состава, которая предназначена для оценки фактического предела выносливости материала осей, находившихся в длительной эксплуатации. В ее основу положены обоснование схемы нагружения, использование специальной испытательной оснастки, воспроизведение асимметричного цикла и расчетная обработка результатов эксперимента.

Повышение требований к безопасности подвижного состава при одновременной необходимости обеспечения экономической эффективности его эксплуатации требует наряду с нормативной оценкой прочности определения фактических характеристик остаточного ресурса. В настоящей работе поставлена задача количественно оценить предел выносливости осей трамвайных вагонов модели 71-605 (КТМ-5М3), изготовленных по ГОСТ 6144-90. База испытаний была принята равной $5 \cdot 10^6$ циклов в соответствии с нормативными требованиями к деталям данного класса [1].

Для проведения эксперимента разработана и изготовлена специальная оснастка, предназначенная для реализации схемы чистого изгиба оси. Циклическую нагрузку создавали с помощью сервогидравлического пульсатора универсальной разрывной машины ТС244.31А. Управление осуществляли программным комплексом Station Manager «MTS FlexTest 40», обеспечивающим поддержание заданных амплитуды и частоты нагружения с требуемой точностью.

Ось размещали на двух опорах, а нагрузку прикладывали в средней части пролета (рисунок 1). Принятая схема воспроизводит характер изгибного нагружения оси в эксплуатационных условиях. Для равномерной передачи усилия и предотвращения местного смятия в зоне контакта использовали специальный вкладыш с цилиндрической выемкой, имитирующий подступичную часть оси.



Рисунок 1 – Реализация принятой расчетно-испытательной модели

Испытания выполняли при асимметричном цикле нагружения с коэффициентом асимметрии $R_\sigma = 0{,}1$, характерным для колесных пар. Для образца № 1 максимальная и минимальная нагрузки составляли соответственно 149,4 и 14,94 кН, для образца № 2 – 245,0 и 24,50 кН. Такие уровни нагружения были выбраны для оценки влияния максимальных напряжений на долговечность осей.

Состояние образцов проверяли через каждые 500 тыс. циклов. По окончании испытаний проводили визуальный и инструментальный контроль участков концентрации напряжений: шеек, прессовых частей и галтелей. Контроль был направлен на выявление трещин и других признаков разрушения.

Основной расчетный этап методики заключается в переходе от параметров внешней нагрузки к характеристике усталостной прочности материала. Эквивалентный предел выносливости определяли с учетом геометрии опасного сечения и концентрации напряжений. При максимальной нагрузке 149,4 кН его расчетное значение составило 200 МПа, а при нагрузке 245,0 кН – 328 МПа. Полученные значения согласуются с характером кривой усталости и указывают на сохранение высоких прочностных свойств стали ОсЛ после длительной эксплуатации.

После достижения базы $5 \cdot 10^6$ циклов критических дефектов и разрушений на исследованных осях не обнаружено. Результаты подтверждают работоспособность предложенной методики и наличие достаточного запаса усталостной прочности испытанных осей. Сопоставление с результатами испытаний стандартных образцов позволяет заключить, что в рассматриваемых условиях масштабный фактор и технологическая наследственность не оказывают определяющего влияния на предел выносливости натурных осей.

Таким образом, разработана и прошла апробацию методика стендовых усталостных испытаний натурных осей подвижного состава, предназначенная для получения обоснованных значений фактического предела выносливости. Для осей трамвайных вагонов модели 71-605 установлено, что данный показатель составляет не менее 200 МПа. Методика может быть адаптирована к оценке ресурса осей вагонов метрополитена, локомотивов и специального железнодорожного подвижного состава. Ее применение также возможно при сертификации и решении вопросов о продлении срока службы деталей.

Список литературы

1 ГОСТ 6144-90. Оси трамвайных вагонов. Технические условия : межгос. стандарт. – Введ. 1991-06-30. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 8 с.

УДК 620.178.3

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ МЕТОДОМ «ЛЕСТНИЦЫ» ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ СТАЛИ МАРКИ ОсЛ ДЛЯ ТРАМВАЙНЫХ ОСЕЙ

В. В. КОМИССАРОВ, Е. С. ТАРАНОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Оценка остаточного ресурса ответственных элементов подвижного состава непосредственно связана с обеспечением безопасности перевозок. Одной из ключевых задач является определение предела выносливости материала (σ_{-1}), поскольку усталостные разрушения развиваются скрытно и могут проявляться внезапно. Традиционный подход, регламентированный ГОСТ 25.502-79 [1], предусматривает построение полной кривой усталости, что требует значительного количества образцов и продолжительного времени испытаний. При необходимости оперативной оценки ресурса большой партии деталей данный подход не всегда является рациональным. Альтернативой служит метод ступенчатого изменения нагрузки – метод «лестницы», или метод «вверх-вниз», который позволяет сконцентрировать испытания в узкой области, близкой к искомому пределу выносливости, и при меньших затратах определить его статистические характеристики: среднее значение $\overline{\sigma}_{-1}$, среднеквадратическое отклонение $S_{\overline{\sigma}_{-1}}$ и коэффициент вариации $\nu_{\overline{\sigma}_{-1}}$. Работа посвящена применению данного метода к стали марки ОсЛ, эксплуатировавшейся в трамвайных осях в течение 12 лет.

Метод «лестницы» основан на последовательном изменении уровня нагрузки. Если образец выдерживает заданную базу циклов, напряжение для следующего образца увеличивают на величину

Δσ; при разрушении образца напряжение уменьшают на Δσ. В ходе испытаний устанавливают область перехода между уровнями напряжений, при которых образцы разрушаются, и уровнями, при которых они выдерживают заданную базу циклов. Полученные результаты подвергают статистической обработке.

Испытаниям подвергали 18 образцов из стали марки ОсЛ, изготовленных из трамвайной оси после истечения нормативного 12-летнего срока службы. Одну и ту же выборку использовали для определения σ_{-1} двумя методами: стандартным методом по ГОСТ 25.502-79 и методом «лестницы». Это позволило определить значение предела выносливости и сопоставить результаты, полученные независимыми способами.

Испытания проводили на машине UBM 200tC при частоте 50 Гц по схеме чистого изгиба с вращением образца. База испытаний составляла 10^7 циклов; критерием предельного состояния являлось разрушение образца с разделением на две части. По результатам статистической обработки методом «лестницы» получены средний предел выносливости $\overline{\sigma}_{-1}$ = 330 МПа; среднеквадратическое отклонение $S_{\overline{\sigma}_{-1}}$ = 0,9396 МПа; коэффициент вариации $\nu_{\overline{\sigma}_{-1}}$ = 0,00285.

Стандартный метод, основанный на графической интерполяции кривой усталости, дал идентичное значение предела выносливости: σ_{-1} = 330 МПа. Показатель наклона левой ветви кривой усталости составил m_σ = 19,5, абсцисса точки перелома – $N_{G\sigma} = 1{,}33 \cdot 10^6$ циклов.

Согласно литературным источникам, для надежного определения $\overline{\sigma}_{-1}$ и $S_{\overline{\sigma}_{-1}}$ методом «лестницы» рекомендуется испытывать не менее 20–30 образцов [2, 3]. В настоящем исследовании использовано 18 образцов, что соответствует нижней границе рекомендуемого диапазона. Вместе с тем полученное значение коэффициента вариации существенно ниже типичных значений для лабораторных стальных образцов ($\nu \approx 0{,}05$), что свидетельствует о высокой однородности исследуемого материала и выборки.

Совпадение результатов, полученных двумя независимыми методами, подтверждает достоверность экспериментальных данных, отсутствие выраженной систематической погрешности, однородность материала и применимость метода «лестницы» для оценки предела выносливости при ограниченном объеме выборки.

Таким образом, метод «лестницы» может быть рекомендован для практической оценки остаточного ресурса ответственных элементов подвижного состава. Он обеспечивает результат, сопоставимый со стандартным методом построения кривой усталости, при снижении трудоемкости и продолжительности испытаний.

Список литературы

1 ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость : межгос. стандарт. – Введ. 1981-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 50 с.

2 **Серенсен, С. В.** Несущая способность и расчет деталей машин на прочность : руководство и справ. пособие / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович ; под ред. С. В. Серенсена. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 488 с.

3 **Степнов, М. Н.** Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справ. / М. Н. Степнов, А. В. Шаврин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 2005. – 399 с. – ISBN 5-217-03272-3.

УДК 629.4.077:519.87

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЫЧАЖНОЙ ПЕРЕДАЧИ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВАГОНА

А. В. КОТОВ
ОАО «Сейсмотехника», г. Гомель, Республика Беларусь
Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

Д. Г. КРОЛЬ
Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

Тормозные системы играют важную роль в безопасности подвижного состава, так как от их надежной работы зависит своевременность остановки поезда, величина тормозного пути и в конеч-

ном счете сохранность жизни и здоровья пассажиров, сохранность грузов и инфраструктуры [1]. Особое место среди подсистем тормозного оборудования занимает рычажная передача, которая обеспечивает передачу усилия от тормозного цилиндра к тормозным колодкам и их прижатие к поверхности катания колеса. Именно от кинематики и динамики рычажного механизма во многом зависит равномерность распределения усилий между колодками, быстродействие тормоза и его энергоэффективность [2].

Объектом настоящего исследования выступает рычажная передача тормозной системы железнодорожного вагона как отдельная группа многозвенных механизмов. Независимо от конструкции вагона и числа осей такие передачи обладают общими свойствами, определяющими сложность их математического моделирования. Кинематическое описание классическим методом замкнутых векторных контуров Зиновьева представляет собой довольно сложную задачу, тем более с учетом возможного пространственного движения звеньев. Силовой анализ таких механизмов в традиционной трактовке также требует составления и решения большого числа уравнений равновесия, что накладывает определенные ограничения при составлении расчетных схем и не всегда удобно.

В качестве примера на рисунке 1 приведена кинематическая схема рычажной передачи тормозной системы четырехосного вагона.

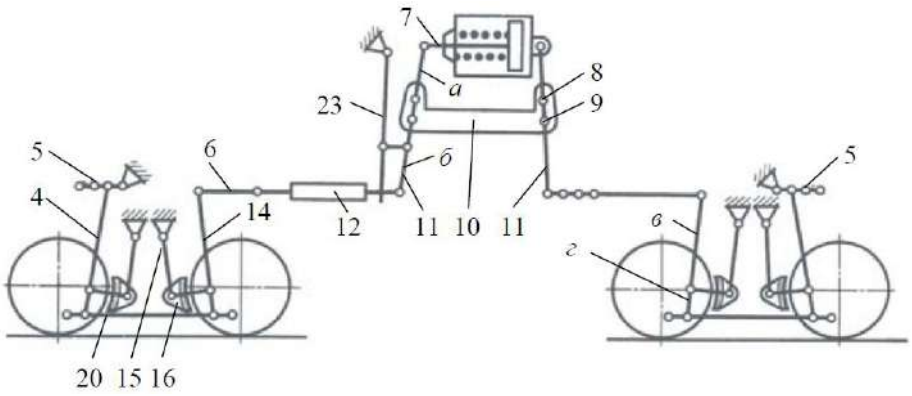


Рисунок 1 – Кинематическая схема рычажной передачи тормозной системы подвижного состава [3]:
а–г – плечи; *4* – вертикальный рычаг; *5* – серьга; *6* – тяга; *7* – шток тормозного цилиндра;
8 – верхнее отверстие; *9* – нижнее отверстие; *10* – затяжка; *11* – горизонтальный рычаг;
12 – авторегулятор; *14* – вертикальный рычаг; *15* – подвеска; *16* – башмак; *20* – распорка; *23* – рычаг
(позиции *1–3, 13, 17–19, 21, 22* приводятся в специальной литературе)

В учебной и научной литературе рычажным механизмам тормозной системы уделяется внимание преимущественно с точки зрения описательной характеристики и принципа работы. Кинематические расчеты ограничены, как правило, лишь пересчетом плеч на подвижных рычагах, а силовой анализ – рассмотрением одного конкретного положения механизма. Для инженерной практики этого вполне достаточно, однако детальный анализ механизма требует построения математической модели, позволяющей выполнять полный кинематический и силовой анализ для целого ряда положения механизма. Такая модель даст возможность рассчитывать скорости и ускорения всех характерных точек и звеньев, а учет массово-инерционных характеристик позволит достоверно оценить нагруженность передачи. При этом вопросам синтеза применительно именно к рычажной передаче тормозной системы известные работы практически не посвящены: существующие подходы носят общий характер и не учитывают специфику рассматриваемой группы механизмов.

Учет массово-инерционных характеристик приобретает особую значимость в связи с тем, что время срабатывания механизма торможения от передачи усилия до замыкания всех колодок составляет около 0,5 с [3]. На этом интервале в механизме кратковременно действуют значительные нагрузки, вызванные инерцией массивных звеньев. В учебной литературе этот фактор, как правило, не рассматривается, что снижает достоверность выводов о нагруженности и работоспособности рычажной передачи.

На сегодня достаточно эффективным методом решения кинематических задач на фоне известных выглядит метод преобразования координат в неизменном базисе с применением теории комплексных чисел [4]. Он позволяет единообразно описывать положение, скорость и ускорение точек и звеньев механизма и хорошо адаптируется к математическим пакетам, способным оперировать с

комплексными числами. Результаты данного метода хорошо адаптируются для разработанного аналитического метода силового анализа плоских рычажных механизмов с применением теории комплексных чисел [5]. Указанные методы показали высокую эффективность при анализе различных плоских рычажных механизмов, а их результаты могут найти применение в задачах оптимизационного синтеза рычажных механизмов с применением комплексных чисел, например, по углу давления, направленные на снижение силовой нагруженности в кинематических парах [6].

Несмотря на то, что рычажная система тормозной передачи представляет собой пространственную конструкцию с возможным расположением звеньев в двух плоскостях, она (с учетом ряда допущений) может быть сведена к плоской расчетной схеме. Именно это обстоятельство делает применимыми рассмотренные современные подходы к кинематическому и силовому анализу таких механизмов, а также открывает возможность их последующего оптимизационного синтеза. Это подтверждает необходимость разработки специализированной математической модели рычажной передачи.

Целью настоящей работы является применение новых методов анализа и синтеза механизмов для решения практических задач, связанной с математическим моделированием рычажной передачи тормозной системы вагона. Практическая значимость ожидаемых результатов связана с повышением точности оценки нагруженности рычажной передачи, обоснованием рациональных параметров звеньев и, как следствие, с повышением надежности и безопасности тормозной системы в целом.

Проведенный анализ показывает, что рычажная передача тормозной системы вагона представляет собой сложный многозвенный механизм, математическое моделирование которого выходит за рамки традиционных инженерных методик. При проектировании таких тормозных систем необходимо применять современные методы кинематического и силового анализа, которые построены на теории комплексных чисел. Эти методы создают хорошую основу для дальнейшего оптимизационного синтеза механизма.

Список литературы

1 **Крылов, В. И.** Автоматические тормоза подвижного состава : учеб. для учащихся техникумов ж.-д. трансп. / В. И. Крылов, В. В. Крылов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1983. – 360 с.

2 **Гребенюк, П. Т.** Правила тормозных расчетов / П. Т. Гребенюк. – М. : Интекст, 2004. – 110 с.

3 **Галай, Э. И.** Тормозные системы железнодорожного транспорта. Конструкция тормозного оборудования : учеб. пособие / Э. И. Галай, Е. Э. Галай. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 315 с.

4 **Котов, А. В.** Способ и программная реализация кинематического анализа кулисного механизма / А. В. Котов, Д. Г. Кроль // Механика машин, механизмов и материалов. – 2025. – № 4 (73). – С. 25–30. – DOI: https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-25-30. – EDN GQCRGY.

5 **Котов, А. В.** Аналитический метод силового анализа плоских рычажных механизмов с применением теории комплексных чисел / А. В. Котов, Д. Г. Кроль // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – 2025. – № 4 (103). – С. 5–15. – DOI: https://doi.org/10.62595/1819-5245-2025-4-5-15. – EDN BEABEP.

6 **Котов, А. В.** Оптимизационный синтез плоских рычажных механизмов по углу давления / А. В. Котов, Д. Г. Кроль // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2026. – № 1 (19). – С. 33–39. – EDN USEEDK.

УДК 629.4.027

КОНСТРУКЦИИ СКОРОСТНЫХ ПЛАТФОРМ

Л. С. КУЩЕНКОВА
Нижегородский институт путей сообщения –
филиал Приволжского государственного университета путей сообщения,
Российская Федерация

Скоростные платформы – специализированный железнодорожный подвижной состав для перевозки крупнотоннажных контейнеров на скоростях до 140 км/ч (рисунок 1). Их развитие обусловлено потребностями в ускорении доставки грузов, особенно скоропортящихся и высокомаржинальных товаров.

Ключевые преимущества:

– сокращение сроков доставки;

– возможность интеграции в пассажирский график движения;

– повышенная пропускная способность на ключевых направлениях (например, Дальний Восток – Европа).

Одним из ярких примеров является скоростная шестиосная 80-футовая вагон-платформа модели 13-6704 (производитель «Синара Транспортные Машины»). Разработана по техническому заданию Федеральной грузовой компании при участии ВНИКТИ (рисунок 1).



Рисунок 1 – Скоростная шестиосная 80-футовая вагон-платформа модели 13-6704

Другими участниками рынка являются Калужский завод «Ремпутьмаш» (входит в холдинг «Синара»), а также компания «М-Рейл» (подписала соглашение с РЖД на поставку фитинговых платформ с тележками на 140 км/ч).

Конструкционные особенности:

1) тележки:

– трехосные тележки снижают воздействие на путь без потери грузоподъемности (рисунок 2);

– осевая нагрузка – 20 тс (статическая нагрузка от колесной пары на рельс – 196,2 кН);

2) тормозная система:

– автоматический пневматический тормоз (1 шт.);

– электропневматический тормоз (ЭПТ) – основной для скоростного движения (повышает управляемость, сокращает тормозной путь на 15–20 %);

– стояночный тормоз с ручным приводом (2 шт.);

– тормозная рычажная передача с двусторонним нажатием колодок;

– блок тормозного оборудования БТО 111 (разработка АО «МТЗ Трансмаш») - модульное решение с диагностикой параметров в реальном времени;

3) конструкция платформы:

– длиннобазная конструкция (длина по осям автосцепок – 26 360 мм, база – 19 200 мм);

– фитинговые крепления для контейнеров разных типоразмеров;

– габаритные размеры соответствуют ГОСТ 0-ВМ;

4) материалы и технологии:

– применение инновационных материалов для снижения массы тары;

– цифровизация (системы диагностики передают данные о состоянии тормозов на монитор локомотива и в диспетчерские центры).



Рисунок 2 – Трехосные тележки

Технические характеристики данной модели представлены в таблице 1.

Таблица 1 – **Технические характеристики модели 13-6704**

Параметр	Значение
Конструкционная скорость, км/ч	140
Число осей, шт.	6
Грузоподъемность, т	75
Масса тары, т	45 т
Статическая нагрузка на рельс, кН (тс)	196,2 (20)
Длина по осям автосцепок, мм	26 360
База платформы, мм	19 200

Платформа совместима с контейнерами различных типоразмеров: 20, 40, 45, 53 фута, а также специализированными контейнерами (1EEE, 1EE, 1C, 1CC, 1CX, 1A, 1AA, 1AAA, 1AX).

Примеры схем загрузки:

– два 40-футовых контейнера;

– комбинация 40 + 20 футов;

– четыре 20-футовых контейнера и т. д.

Преимущества конструкции:

– скорость – эксплуатационная скорость до 140 км/ч сокращает время доставки;

– грузоподъемность: возможность перевозки двух 40-футовых контейнеров при осевой нагрузке 20 тс;

– универсальность: поддержка контейнеров разных размеров и типов;

– безопасность: ЭПТ и диагностика снижают риск аварийных ситуаций;

– интеграция в цифровую инфраструктуру: данные о состоянии тормозов передаются в режиме реального времени, что упрощает обслуживание.

Несмотря на преимущества, массовое внедрение скоростных платформ сталкивается с рядом проблем:

1) инфраструктура:

– пути должны выдерживать повышенные скорости и нагрузки;

– требуется модернизация станций и терминалов;

2) локомотивы: необходимы тепловозы, способные тянуть тяжелые скоростные составы;

3) пропускная способность: текущие сети загружены, добавление скоростных поездов усложняет график;

4) экономические факторы:

– высокая стоимость платформ (около 5,5–5,7 млн руб.);

– окупаемость возможна только при серийном производстве и активном использовании;

5) нормативная база: требуется согласование стратегий Минтранса и Минпромторга для развития скоростного грузового движения.

Перспективы развития:

– расширение парка платформ для ключевых маршрутов (Москва – Дальний Восток, Сибирь – Дальний Восток, коридор «Север – Юг»);

– внедрение интеллектуальных систем управления поездами на базе данных, полученных от тормозных систем;

– снижение стоимости за счет серийного производства и применения новых материалов;

– синхронизация с развитием инфраструктуры (модернизация путей, станций, портов).

Скоростные платформы, такие как модель 13-6704, представляют собой перспективное решение для ускорения грузовых перевозок. Их конструкция сочетает высокую скорость, грузоподъемность и современные технологии диагностики. Однако для массового внедрения необходимы инвестиции в инфраструктуру, локомотивный парк и нормативную базу. При решении этих задач скоростные платформы могут стать ключевым элементом транзитных коридоров и повысить конкурентоспособность российских грузоперевозок на международном уровне.

УДК 621.313.333

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ВИТКОВ В ОБМОТКЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Д. В. МИРОШ, В. Н. ГАЛУШКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Безопасность на железнодорожном транспорте является важнейшей задачей как работников данной отрасли, так и тех, кто формирует образовательные компетенции и готовит молодых специалистов к будущей трудовой деятельности. На Белорусской железной дороге большое значение уделяется системам электроснабжения, поэтому в данной статье будет представлена одна из методик, позволяющих на ранних этапах отслеживать изменения на потребителях электрической энергии – асинхронных электродвигателях.

Асинхронные электродвигатели широко распространены на железной дороге на тяговом подвижном составе. Их применение на грузовых электровозах и электропоездах обусловливает необходимость поддерживать надежность их работы, а также параметры функционирования, заданные заводом-изготовителем. Количество вспомогательных электродвигателей, имеющих асинхронный привод, только на грузовом электровозе ВЛ80^{С} достигает нескольких тысяч. Со временем надежность локомотивов снижается, а это свидетельствует о росте внезапных отказов оборудования.

Необходимо выделить наиболее распространенные неисправности. Среди них две наиболее выраженные: дефект подшипникового узла и межвитковое замыкание обмотки статора [1].

Указанные дефекты (помимо прочего) могут оказывать непосредственное влияние на развитие других скрытых неисправностей. Так, межвитковое замыкание в обмотке способствует неравномерному распределению токов статора. Повышенное значение тока в обмотке приводит к локальным нагревам материалов обмотки (проводник) и элементов статора электродвигателя (магнитопровод, станина). Повышенный нагрев, который передается впоследствии на подшипниковый узел, способствует ускорению дегенеративных процессов смазочных материалов. Нагрев обмотки при разогревании, как известно, вызывает расширение металла, что способствует возникновению неравномерности воздушного зазора, а с этим приводит к эксцентриситету ротора.

Схемотехническая реализация метода представлена на рисунке 1.

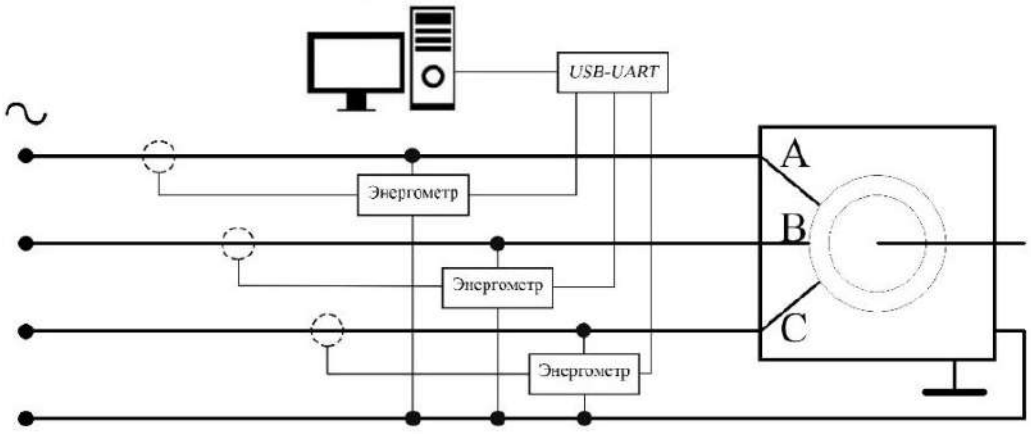


Рисунок 1 – Схемотехническое исполнение комплекса по обнаружению короткозамкнутых витков в обмотке статора асинхронного электродвигателя

В ходе исследования были созданы дефектные состояния электродвигателя. Среди них межвитковое и межфазное короткое замыкание, замыкание на корпус. Управление режимами замыканий выполнялось с помощью кнопочных выключателей, расположенных на крышке подшипникового щита электродвигателя. Помимо этого, как показано на рисунке 1, при помощи датчиков измерялись токи в каждой фазе, а при помощи энергометров – фазное напряжение. Суммарно это позволило закрыть потребность в получении основных параметров работы электродвигателя и сформи-

ровать процедуру действий по предотвращению опасных отказов во время возникновения опасных замыканий или при отклонениях в питающей сети.

Проведенная серия экспериментов по установлению коротких замыканий (межвитковых, межфазных, на корпус) на электродвигателях серий 4А и АИР мощностью от 0,12 до 1,7 кВт позволила выявить минимум необходимого и крайне дешевого оборудования, способного отслеживать возникновение неисправности, а также, в случае необходимости, принимать решение по сохранению дорогостоящих электродвигателей вспомогательных машин [2]. Данная методика раннего обнаружения неисправностей является экономически обоснованным и технически необходимым решением. Она позволяет перейти от стратегии аварийного ремонта к стратегии предотвращения отказов, что гарантирует сохранность дорогостоящего оборудования. Прямым следствием внедрения данной технологии является повышение пожарной безопасности, улучшение условий труда обслуживающего персонала и, как результат, – общий рост уровня безопасности на транспорте.

Список литературы

1 **Мирош, Д. В.** Нейронные сети в диагностике. Анализ неисправностей асинхронных двигателей железнодорожной отрасли и их диагностика на базе искусственного интеллекта / Д. В. Мирош, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. – 2023. – № 4. – С. 30–32.

2 **Мирош, Д. В.** Нейросетевая обработка параметров состояния асинхронных двигателей при межвитковом замыкании / Д. В. Мирош // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2024. – № 3 (51). – С. 105–115. – DOI: 10.21685/2227-8486-2024-3-9.

УДК 629.42:621.315.55-426:539.3

ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЁЖНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

А. С. НЕВЕРОВ, Е. И. ДОЦЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Для изделий, чей продольный размер намного превышает поперечный, основным видом деформаций является изгиб. В первую очередь это касается проволоки. Медная проволока – основа всей электроники и электротехники, и одной из наиболее частых причин различного рода аварийных ситуаций в этой индустрии является разрушение соединительных проводов в результате многократных знакопеременных изгибов.

Ситуация обостряется для систем электроснабжения подвижного состава в связи с тем, что в процессе движения они подвергаются длительному воздействию знакопеременных нагрузок, существенно снижающих их надёжность. Поскольку в рабочем состоянии по проводам протекает электрический ток или они находятся под воздействием электрического потенциала того или иного знака, немаловажной является оценка влияния этих факторов на устойчивость проводов к многократному изгибу.

Перемещение дислокаций лежит в основе механизма усталостного разрушения, который связан с развитием и накоплением в поверхностном слое микропластической деформации. Анизотропия кристаллов и их случайная ориентация обусловливают возможность возникновения в отдельных кристаллах напряжений, достаточных для перемещения слабозакрепленных дислокаций [1].

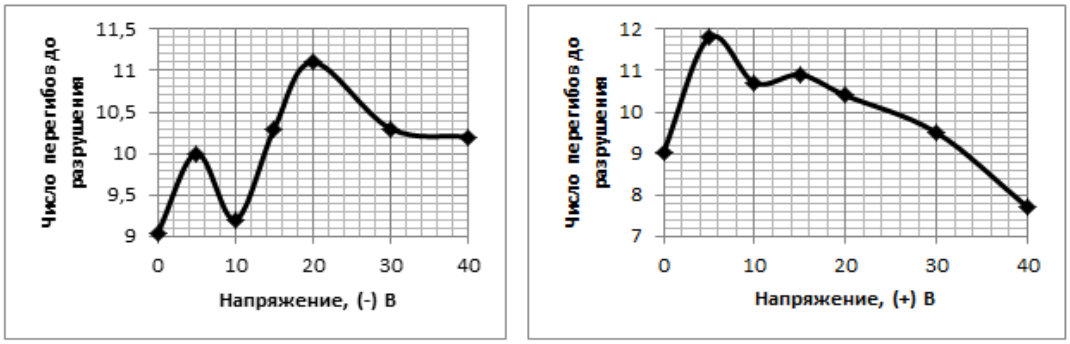
Для проводников, подвергающихся механической деформации, наличие в цепи электрического тока [2] или электрического потенциала, может вызывать эффект электропластичности, под которым понимают снижение величины деформирующего усилия под влиянием электрического тока.

Этот эффект обнаружен и изучен преимущественно применительно к деформации металлов на растяжение [3–5]. При эксплуатации же подвижного состава преобладают деформации под действием знакопеременных нагрузок, приводящих к местным перегибам соединительных проводов и других длинномерных изделий.

Нами выполнены исследования влияния постоянного тока и электродных потенциалов различного знака на устойчивость к усталостному разрушению при перегибах на 180°. В качестве объекта исследования использована медная обмоточная проволока с эмалевой изоляцией (ГОСТ 2615-85) диаметром 0,8 и 0,5 мм.

Источниками напряжения служили прибор ИЭПП-1, выдающий электрическое напряжение 0…±12 В и 0…±40 В, и щелочная батарейка smartbuy, дающая постоянное напряжение 1,5 В. В процессе исследования зависимости числа перегибов до разрушения от электрического потенциала, подаваемого на образец, один из концов проволоки подсоединяли к соответствующему контакту источника напряжения, зажимали образец в тисках и производили перегибы проволоки до ее разлома. Повторяли эксперимент не менее 20 раз для каждого значения напряжения. Полученные результаты для двух медных проволок разного диаметра приведены на рисунке 1.

а)



б)

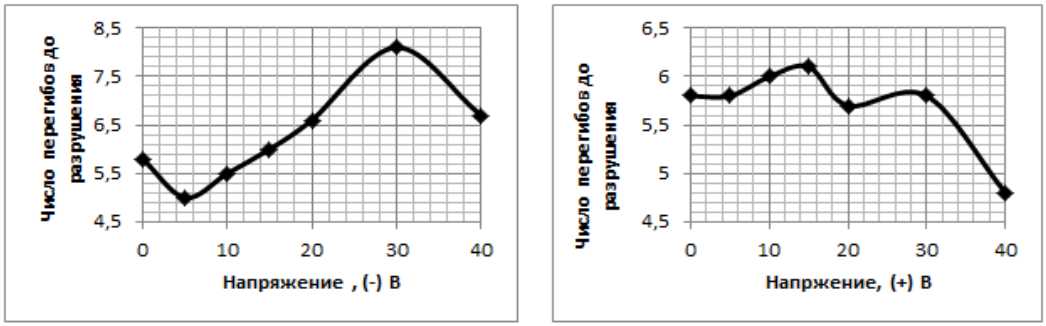


Рисунок 1 – Зависимость числа перегибов на 180° медной проволоки Ø 0,8 мм (*а*) и Ø 0,5 мм (*б*) до разрушения от электрического потенциала различной величины и знака

При определенном различии результатов для образцов разного диаметра общий характер зависимостей сохраняется. При подаче отрицательного потенциала с ростом напряжения число перегибов до разрушения возрастает в обоих случаях, а подача положительного напряжения число перегибов уменьшает. Максимумы числа перегибов при отрицательном потенциале смещены в область 20–30 В, а при положительном – в область 5–15 В.

Влияние тока, протекающего через образец, и сравнение его с воздействием на образец электрического потенциала исследовали, используя в качестве источника электрического напряжения гальванический элемент (батарейку с разностью потенциалов 1,5 В).

Полученные результаты приведены на рисунке 2.

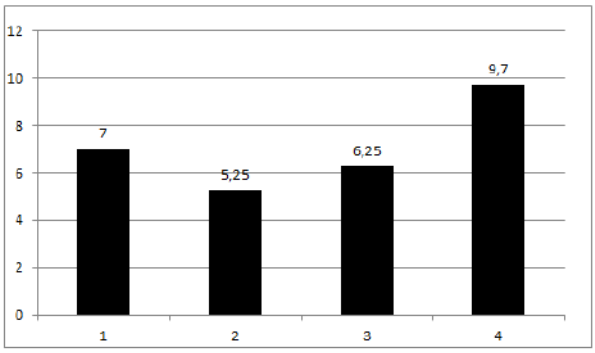


Рисунок 2 – Число перегибов
до разрушения медной проволоки Ø 8 мм
1 – без подключения к источнику напряжения;
2 – подключение к аноду (+1,5 В);
3 – подключение к катоду (– 1,5 В);
4 – в замкнутой цепи источника напряжения 1,5 В
(*1*–*3* среднее число перегибов из 20 измерений;
4 – среднее число перегибов из 30 измерений)

Для данного значения электродного потенциала (1,5 В) подключение к аноду уменьшает устойчивость материала образца к многократным перегибам (уменьшается их число до момента разру-

шения), а подключение к катоду, напротив – увеличивает. Наибольшее увеличение устойчивости (36–38 %) имеет место при пропускании через образцы электрического тока.

Аналогичные результаты получены для медной проволоки Ø 0,5 мм.

Список литературы

1 **Арзамасов, Б, Н.** Материаловедение : учеб. / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин. – 8-е изд., стер – М. : МГТУ им. Баумана, 2008. – 648 с.

2 **Werthein, G.** Annalen der Physik und Chemie / G. Werthein. – 1848. – Vol. 11/11. – P. 1–114.

3 Физические основы электроимпульсной и электропластической обработки и новые материалы / Ю. В. Баранов, О. А. Троицкий, Ю. С. Авраамов, А. Д. Шляпин. – М. : МГИУ, 2001. – 844 с.

4 Влияние температурной обработки и электрического тока на свойства алюминиевых сплавов / В. Б. Деев, И. Ф. Селянин, О. И. Нохрина, Н. В. Башмакова // Заготовительное производство в машиностроении. – 2008. – № 4. – С. 50–53.

5 **Тимченко С. Л.** Влияние электрического тока на структуру и свойства алюминиевого сплава / С. Л. Тимченко, Л. И. Кобелева, Н. А. Задорожный // Физика и химия обработки материалов. – 2011. – № 6. – С. 82–87.

УДК 629.423.4

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ЭР9 С УЧЕТОМ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Л. В. ОГОРОДНИКОВ, Н. С. СЕНЬКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Парк электропоездов ЭР9М, ЭР9Е, ЭР9Т и ЭР9ТМ на Белорусской железной дороге насчитывает 55 единиц. Поезда построены в 1981–1996 гг.; назначенный срок службы составляет 28 лет, продление допускается не более чем до 43 лет. К 2026 г. 96 % тележек данного парка выработали назначенный срок. Ускоренная полная замена парка невозможна, что определяет необходимость обоснованной оценки прочности и остаточного ресурса несущих конструкций.

Цель работы − расчётно-экспериментальная оценка прочности и остаточного ресурса рамы тележки и связанных с ней несущих металлоконструкций электропоездов ЭР9, эксплуатируемых сверх назначенного срока.

Техническое обследование выполнено на электропоездах № 601 и № 602, включающих 20 вагонов 1983 г. постройки. Проведены визуальный контроль, ультразвуковая толщинометрия элементов кузова и главной рамы, разработаны диагностические карты. Коррозионный износ элементов главной рамы не превышает 10 %, обшивки кузова − 8−16 %. Характерные повреждения − сквозная коррозия пола, фальшборта, межлюковых стоек боковых стен и отдельных рёбер жёсткости в зонах размещения туалетов. Остаточные деформации силовых элементов кузова и рамы, способные снизить прочность конструкции, не выявлены.

Напряжённо-деформированное состояние оценивали методом конечных элементов в программном комплексе *DSmFem Static*. Построены модели кузовного головного и прицепного вагонов. Модель прицепного вагона содержала 143 889 узлов и 141 754 конечных элемента. Расчёты выполнены для режимов I–IV по ГОСТ 33796-2016 [1]. В режиме Iб максимальные эквивалентные напряжения составили 215,06 МПа в обшивке боковой стены и 209,75 МПа в шкворневых балках при допускаемом значении 265,5 МПа. В режимах вертикальных динамических нагрузок IIа и III напряжения не превысили 104,43 и 99,12 МПа при допускаемом значении 177 МПа. Таким образом, металлоконструкции кузова, рамы тележки и надрессорной балки обладают требуемым запасом прочности.

Натурные испытания включали соударение с накатыванием вагона-бойка при продольной силе от 582 до 2000 кН и сброс с клиньев. Напряжения регистрировали тензорезистивными датчиками, включёнными по полумостовой схеме, с использованием усилителя *MGCplus*; продольную силу определяли тензометрической автосцепкой СА-3. При соударении максимальные амплитудные напряжения достигли 278,2 МПа в зоне крепления раскоса, остаточных деформаций металлоконструкций не обнаружено. При сбросе с клиньев максимальные напряжения составили 23,2 МПа, коэффициент вертикальной динамики подрессоренных частей $K_{дв}$ = 0,11. Совпадение расчётных и экспериментальных результатов подтвердило достоверность конечно-элементных моделей.

Для определения фактических свойств материала из зон максимальных напряжений рамы тележки были вырезаны образцы для испытаний на растяжение, ударную вязкость, твёрдость и механическую усталость. Химический состав определён на оптико-эмиссионном спектрометре ДФС-500. Материал − углеродистая сталь обыкновенного качества Ст3сп. После приблизительно 40 лет эксплуатации материал сохраняет требуемые механические свойства: предел текучести составляет 340–355 МПа, предел прочности 495–553 МПа, относительное удлинение 26,1–27,8 %, твёрдость составляет 73 HRB; ударная вязкость KCU при температурах +20 и –20 °С равна соответственно 256 и 81 Дж/см². Марку стали и методы испытаний принимали по ГОСТ 380-2005 [2], ГОСТ 535-2005 [3], ГОСТ 1497-84 [4] и ГОСТ 9454-78 [5].

Испытания на механическую усталость проводили при изгибе с вращением на машине UBM 200tC с частотой 50 Гц и базой 107 циклов. По результатам обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов предел выносливости материала рамы тележки $\sigma_{-1} = 215$ МПа, абсцисса точки перелома кривой усталости $N_{G\sigma} = 0{,}96 \cdot 10^6$ циклов, показатель наклона ее левой ветви $m_\sigma = 8{,}3$.

Остаточный ресурс определяли по коэффициенту запаса сопротивления усталости с использованием фактического предела выносливости, измеренных амплитуд динамических напряжений и линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений [6]. При минимально допустимом коэффициенте запаса $n = 1{,}3$ в большинстве контрольных зон расчётный ресурс превышает 100 лет. Минимальная долговечность 15,4 года получена в зоне присоединения раскосов к боковой балке рамы тележки, которая является определяющей при продлении срока службы.

Комплексное обследование, конечно-элементное моделирование, натурные испытания и лабораторное исследование материала подтвердили соответствие несущих металлоконструкций электропоезда ЭР9 требованиям прочности. Сталь Ст3сп рамы тележки сохраняет удовлетворительные механические и усталостные характеристики после длительной эксплуатации. Остаточный ресурс несущей конструкции оценивается не менее чем в 15 лет при условии регулярного контроля и своевременного устранения коррозионных повреждений, прежде всего в зоне присоединения раскосов к боковой балке рамы тележки.

Список литературы

1 ГОСТ 33796-2016. Моторвагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам. – М. : Стандартинформ, 2016. – 44 с.

2 ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. – М. : Стандартинформ, 2008. – 11 с.

3 ГОСТ 535-2005. Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2006. – 16 с.

4 ГОСТ 1497-2023. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 2024. – 54 с.

5 ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 12 с.

6 Прогнозирование остаточного ресурса вагона хоппер-дозатора после длительной эксплуатации с учетом фактических физико-механических характеристик материала несущей конструкции / А. В. Путято, Е. Н. Коновалов, П. М. Афанаськов [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 1 (34). – С. 26–35.

УДК 539.375

О РАЗЛИЧИИ ВЕЛИЧИН ПЛОТНОСТИ ДВОЙНИКУЮЩИХ ДИСЛОКАЦИЙ НА ГРАНИЦАХ ОСТАТОЧНЫХ И УПРУГИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ДВОЙНИКОВ

О. М. ОСТРИКОВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Плотность двойникующих дислокаций на двойниковых границах является важным параметром, определяющим уровень концентрации напряжений, обуславливающих зарождение трещин и дальнейшее разрушение деталей машин, изготовленных и двойникующихся материалов. Поэтому изучение вопросов, связанных с эволюцией двойникующих дислокаций на границах двойников является важной научной и практической задачей [1, 2], в том числе в области безопасности транспорта.

Упругие двойники исчезают после снятия нагрузки на кристалл, а остаточные – остаются в нем [1, 2]. Как было показано в работе [2], это связано с величиной сил неупругой природы, препятствующих движению двойникующих дислокаций.

Цель данной работы – анализ величин плотностей двойникующих дислокаций на границах упругих и остаточных двойников.

В работе [1], посвященной упругому двойникованию, показано, что расстояние между двойникующими дислокациями у упругих двойников сравнительно велико. Это приводит к тому, что упругие двойники тонкие и степень некогерентности их границ, а также напрямую связанная с ней линейная плотность двойникующих дислокаций, мала. После снятия нагрузки исчезновение упругих двойников происходит, как правило, путем перемещения двойникующих дислокаций на поверхность кристалла, где они и аннигилируют.

В ряде работ [2–5] рассматриваются остаточные двойники клиновидной формы, двойниковые границы которых обладают совершенно иными свойствами по сравнению с границами упругих двойников. А именно границы остаточных двойников такой формы имеют высокую степень некогерентности, а вместе с этим и высокую плотность двойникующих дислокаций, что в свою очередь ведет и к значительно более высокому уровню напряжений, создаваемых границами остаточных двойников по сравнению с границами упругих двойников [6]. Именно благодаря этому свойству остаточные клиновидные двойники и интересны с позиций механики разрушения [7] и безопасности эксплуатации транспортных систем.

После снятия нагрузки остаточные двойники не исчезают, а остаются в твердом теле (отсюда и их название). При этом двойникующие дислокации стремятся выйти на поверхность путем перемещения в обратном направлении по сравнению с направлением развития двойника, заданном нагрузкой. Но выходу на поверхность двойникующим дислокациям остаточных двойников препятствуют силы внутреннего трения, природа которых связана не только с силами Пайерлса, но и с полными, и с сидячими дислокациями. Таким образом, остаточные двойники, в отличие от упругих двойников, могут сформироваться только в достаточно сильно деформированных дефектных областях твердого тела.

Препятствие, оказываемое силами внутреннего трения выходу двойникующих дислокаций остаточных двойников на поверхность, приводит к тому, что под действием сил притяжения двойникующих дислокаций к поверхности и сил междислокационного взаимодействия, которые стремятся выстроить дислокации в стенку, двойникующие дислокации сближаются на расстояния, существенно меньшие, чем в случае упругих двойников. Это в свою очередь приводит к существенному нарушению когерентности двойниковых границ, которое является неотъемлемым свойством остаточных двойников клиновидной формы.

Уменьшению расстояния между двойникующими дислокациями на границах остаточных двойников дефектность области кристалла, в которой развивается двойник, способствует и в процессе развития двойника. Полные дислокации, имеющиеся в избыточном количестве в таких областях, препятствуют развитию двойника и тем самым способствуют уменьшению расстояния между двойникующими дислокациями уже на стадии формирования двойника.

Для определения реальной плотности двойникующих дислокаций на границах остаточных двойников в настоящее время существуют методы, результаты которых согласуются с результатами трансмиссионной электронной микроскопии [5]. Эти методы связаны с измерениями геометрических параметров остаточных двойников по их изображениям, полученным с помощью оптической или растровой электронной микроскопии [8]. По геометрическим параметрам двойников достаточно просто рассчитывается степень некогерентности η их границ $\eta = H/L$ (здесь H – ширина двойника у устья; L – длина двойника), а учет величины межатомного расстояния a позволяет по формуле $\rho = H/aL$ рассчитать и плотность двойникующих дислокаций ρ (её величина может варьироваться в достаточно широком диапазоне в зависимости от степени дефектности области кристалла, в которой находится остаточный двойник).

Согласно [9, 10] плотности двойникующих дислокаций у упругих и остаточных двойников могут отличаться на два-три порядка. В случае двойникования при локальном деформировании поверхности, когда область развития двойников существенно дефектна, а силы внутреннего трения в ней особенно велики, плотность двойникующих дислокаций на границах остаточных двойников имеет максимальное значение.

Следует отметить, что функция линейной плотности двойникующих дислокаций в [1, 11] принимается и положительной, и отрицательной, в то время как численные значения плотности двойникующих дислокаций на двойниковых границах всегда положительные [7, 11].

Таким образом, показано, что линейные плотности двойникующих дислокаций на двойниковых границах упругих и остаточных двойников отличаются на два-три порядка. Функция плотности двойникующих дислокаций может быть как положительной, так и отрицательной, а численные значения этого параметра всегда положительные.

Результаты имеют важное значение в вопросах безопасности эксплуатации транспортных систем, так как границы остаточных двойников являются концентраторами больших внутренних напряжений, приводящих к зарождению разрушения.

Список литературы

1 **Косевич, А. М.** Дислокационная теория упругого двойникования кристаллов / А. М. Косевич, В. С. Бойко // Успехи физических наук. – 1971. – Т. 104, № 2. – С. 201–255.

2 **Остриков, О. М.** Методика прогнозирования распределения полей напряжений в реальных кристаллах с остаточными некогерентными двойниками : монография / О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 278 с.

3 **Остриков, О. М.** Кинетика образования клиновидных двойников в кристаллах висмута, облученных нерастворимыми в матрице мишени ионами / О. М. Остриков // Физика металлов и металловедение. – 1999. – Т. 87, № 5. – С. 78–82.

4 **Остриков, О. М.** Форма клиновидных двойников в локально деформируемых ионноимплантированных монокристаллах висмута / О. М. Остриков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2006. – № 9. – С. 5–7.

5 **Остриков, О. М.** Особенности зарождения клиновидных двойников у отпечатка пирамиды Виккерса на поверхности (111) монокристаллов висмута / О. М. Остриков // Материаловедение. – 2002. – № 1. – С. 17–20.

6 **Остриков, О. М.** Учет формы границ клиновидного двойника в его макроскопической дислокационной модели / О. М. Остриков // Физика металлов и металловедение. – 2008. – Т. 106, № 5. – С. 471–476.

7 **Остриков, О. М.** Методика прогнозирования распределения полей напряжений в системе «остаточный клиновидный двойник – трещина» / О. М. Остриков // Веснік Магілеўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А. А. Куляшова. Серыя В. Прыродазнаўчыя навукі: матэматыка, фізіка, біялогія. – 2019. – № 2 (54). – С. 69–78.

8 **Остриков, О. М.** Механика двойникования твердых тел : монография / О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 301 с.

9 **Остриков, О. М.** Использование полипараксилиленовых тонких пленок при исследовании пластической деформации монокристаллов висмута / О. М. Остриков // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47, № 4. – С. 162–166.

10 **Остриков, О. М.** Влияние плотности двойникующих дислокаций на конфигурацию полей напряжений вблизи клиновидного двойника с различной формой границ / О. М. Остриков // Прикладная механика и техническая физика. – 2008. – Т. 49, № 5. – С. 199–204.

11 **Косевич, А. М.** Дислокации в теории упругости / А. М. Косевич. – Киев : Наук. думка, 1978. – 220 с.

УДК 539.4

ПОСТАНОВКА СТАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ ДЛЯ ЖЕСТКОЗАКРЕПЛЕННОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО КРИСТАЛЛА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ С НЕПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ГРАНИЦАМИ РАЗДЕЛА АУСТЕНИТ/МАРТЕНСИТ, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В. О. ОСТРИКОВ

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

О. М. ОСТРИКОВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В работе [1] показан случай возникновения непараллельных границ раздела аустенит/мартенсит в результате механического сжатия или сжатия с использованием магнитного поля ферромагнитного кристалла с памятью формы Ni_2MnGa. Установлено, что угол поворота аустенитных объемов к поверхности кристалла $\lambda \approx 7°$ [1].

Работы [2–5] направлены на рассмотрение различных вариантов нагружения ферромагнитного кристалла с памятью формы для определения технологических параметров, используемых при проектировании технических систем рабочим элементом, в которых выступает сплав с памятью формы. В качестве таких технических систем выступают датчики, играющие важную роль в обеспечении безопасности эксплуатации транспортных систем.

Цель работы – выполнить постановку статической задачи для находящегося под действием магнитного поля жестко закрепленного ферромагнитного кристалла с памятью формы с мартенситной прослойкой, имеющей непараллельные границы раздела аустенит/мартенсит.

На рисунке 1 показан случай, когда воздействие внешнего магнитного поля на жесткозакрепленный ферромагнитный кристалл с памятью формы приводит к его сжатию и формированию мартенситной прослойки с непараллельными границами раздела аустенит/мартенсит.

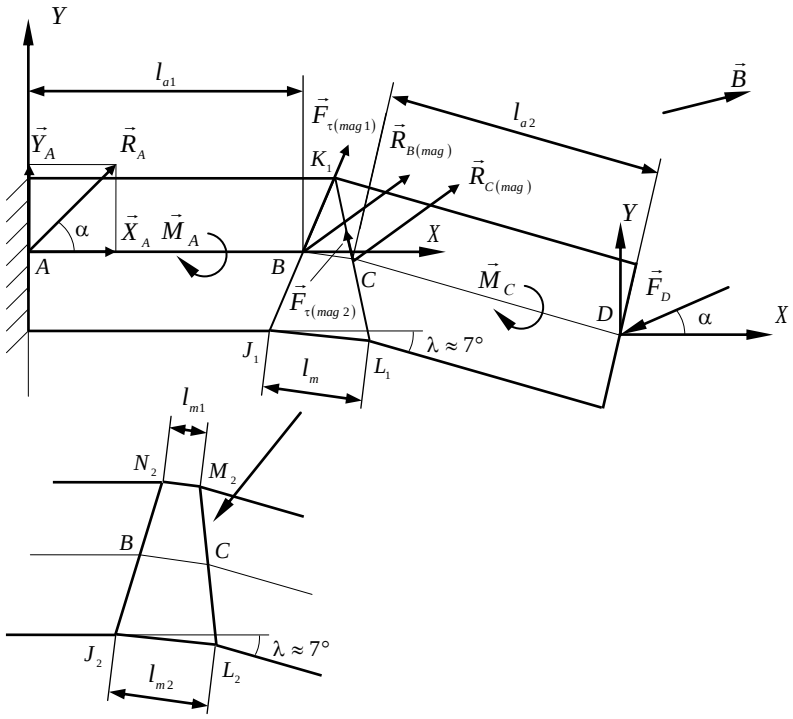


Рисунок 1 – Схематическое изображение ферромагнитного кристалла с памятью формы с мартенситными прослойками $J_1K_1L_1$ и $J_2N_2M_2L_2$, находящегося под действием магнитного поля

Действие магнитного поля приводит к возникновению на межфазных границах мартенситных прослоек $J_1K_1L_1$ и $J_2N_2M_2L_2$ сил $\vec{R}_{B(mag)}$, $\vec{R}_{C(mag)}$ и сдвиговых сил $\vec{F}_{\tau(mag1)}$, $\vec{F}_{\tau(mag2)}$, а также сил реакции $\vec{R}_A$ и $\vec{F}_D$ на торцах аустенитных объемов с длинами l_{a1}, l_{a2}.

Напряжение сжатия $\sigma = 2{,}5$ МПа ферромагнитного кристалла с памятью формы, достигаемое при воздействии магнитного поля $B = 0{,}6$ Тл [1], позволяет определить возникающую на незакрепленном торце силу $\vec{F}_D$, ориентированную к оси DX'' под углом $\varepsilon = 8°$. Известно [2], что реакция жесткой заделки $\vec{R}_A$ и сила $\vec{R}_{B(mag)}$, возникающая на границе раздела аустенит/мартенсит, к оси OX ориентированы под углом $\gamma = 15°$, а силы $\vec{R}_{B(mag)}$ и $\vec{R}_{C(mag)}$, возникающие на межфазных границах мартенситной прослойки, к оси BX' ориентированы под углом $\beta = 11{,}5°$. Сила $\vec{R}_{C(mag)}$ к оси CX'' повернута под углом $\varepsilon = 8°$. При решении статической задачи необходимо определить силы $\vec{R}_{B(mag)}$, $\vec{R}_{C(mag)}$, $\vec{R}_A$ и сдвиговые силы $\vec{F}_{\tau B(mag)}$ и $\vec{F}_{\tau C(mag)}$ (см. рисунок 1).

Таким образом, выполнена постановка статической задачи для случая, находящегося под действием магнитного поля ферромагнитного кристалла с памятью формы с непараллельными межфазными границами. Показано, что воздействие внешнего магнитного поля приводит к возникновению сил на торцах образца и непаралельных границах раздела аустенит/мартенсит.

Результаты имеют важное значение в разработке датчиков нового принципа действия и применимых для обеспечения безопасности эксплуатации транспортных систем.

Список литературы

1 Twin interaction and large magnetoelasticity in Ni-Mn-Ga single crystals / L. Straka, H. Hänninen, N. Lanska, A. Sozinov // Journal of Applied Physics. – 2011. – 109, 063504.

2 **Василевич, Ю. В.** Статика и динамика границ раздела аустенит / мартенсит мартенситной прослойки в нагруженном призматическом ферромагнитном монокристалле с эффектом памяти формы, находящемся в жесткой заделке / Ю. В. Василевич, В. О. Остриков, О. М. Остриков // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: В. К. Шелег (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2023. – Вып. 34. – С. 139–146.

3 **Остриков, В. О.** Расчет сил, действующих на непараллельных границах раздела аустенит / мартенсит в ферромагнитном монокристалле с памятью формы, находящемся в жесткой заделке / В. О. Остриков, О. М. Остриков // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2024. – № 3 (144). – С. 116–121.

4 **Василевич, Ю. В.** Статическая задача механики для границ раздела мартенситной прослойки в случае одноосного растяжения/сжатия ферромагнитного кристалла с эффектом памяти формы / Ю. В. Василевич, В. О. Остриков, О. М. Остриков // Машиностроение : республиканский межведомственный сборник научных трудов / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: В. К. Шелег (гл. ред.), Л. М. Акулович, В. Л. Басинюк [и др.]. – Минск : БНТУ, 2025. – Вып. 36. – С. 173–183.

5 **Василевич, Ю. В.** Использование классических методов механики в решении статической задачи для выступающего в роли исполнительного элемента электромагнитного привода ферромагнитного кристалла с эффектом памяти формы Ni-Mn-Ga с единичной мартенситной прослойкой, возвращаемого в исходное состояние под действием пружины / Ю. В. Василевич, В. О. Остриков, О. М. Остриков // Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Ю. В. Василевич (гл. ред.), А. Абдусаттаров, В. А. Акимов [и др.]. – Минск : БНТУ, 2025. – Вып. 40. – С. 132–139.

УДК 629.4.027.5:620.179.162

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИММЕРСИОННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ КОЛЕСНЫХ ПАР НА БАЗЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ СТЕНДОВ СДВК (СУДКП)

А. Г. ОТОКА, О. В. ХОЛОДИЛОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

На Белорусской железной дороге хорошо зарекомендовал себя иммерсионный ввод ультразвука (УЗ) при помощи стенда УЗ-дефектоскопии ободьев и дисков колёсных пар СДВК (после модернизации носит название «СУДКП»).

Применение такого способа связано, в первую очередь, с меньшим изменением чувствительности от нестабильности контакта через грубо обработанную поверхность цельнокатаного колеса в сравнении с контактным способом. При этом обеспечивается высокая скорость сканирования и производительность контроля. Также при иммерсионном вводе УЗ исключается механический износ ПЭП из-за отсутствия трения между ним и поверхностью контролируемых колес, а значит, отпадает необходимость частой замены изношенных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП).

Ранее нами было предложено усовершенствование технологии иммерсионного УЗ-контроля цельнокатаных колес при плановых видах ремонта колёсных пар (КП) вагонов [1]. На практике были предложены два варианта, позволяющие повысить достоверность контроля и качество настройки браковочной чувствительности:

1) переход преобразователей по варианту методов DR2.1 и DR2.2 с частоты 2,5 на 5,0 МГц в целях уменьшения «мертвой зоны» и отделения полезного сигнала от первого отражённого от внутренней грани по сечению В–В (при условии, что общее усиление дефектоскопа не будет сказываться на появлении «шумов» в пределах одной зоны контроля, тогда как браковочный уровень устанавливается по сечению Д–Д);

2) разделить УЗК на две зоны:

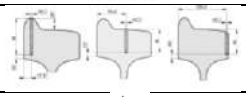
– зона № 1 – от 15 до 80 мм (браковочный уровень по сечению Г–Г);

– зона № 2 – от 60 до 130 мм (браковочный уровень по сечению Д–Д).

Приведем пример создания настроек дефектоскопа(ов) и этапов в программе «СУДКП Регистратор», используемых при автоматическом контроле обнаружения дефектов, для реализации второго варианта.

В базовой комплектации акустический блок включает пять ПЭП № 11–15 с частотой 2,5 Гц и настройки режимов работы дефектоскопа УД2-102 выполняются для каждого канала, а также отдельно для каждого ПЭП левой и правой иммерсионных ванн в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 – **Настройки режимов работы дефектоскопа УД2-102 в комплекте с ПЭП**

Контролируемая зона колеса, вариант метода контроля	Сечение в НО	Эскизы эталонных отражателей по сечениям	Группа ПЭП	Номера настроек дефектоскопа	Угол ввода, град.
Обод DR3.1	Е–Е		11, 21	011, 021	40
Обод DR2.1, DR2.2	В–В*, Г–Г, Д–Д		12, 22	012, 022	0
Гребень DR3.3	И–И		13, 23	013, 023	50
Обод, зона перехода обода в диск	К–К		14, 24	014, 024	–45
			15, 25	015, 025	+45
*На практике сигнал трудно отделить от первого отраженного от внутренней грани обода.					

В нашем случае было предложено оборудовать акустический блок дополнительным ПЭП № 16 с частотой 5 МГц (рисунок 1).

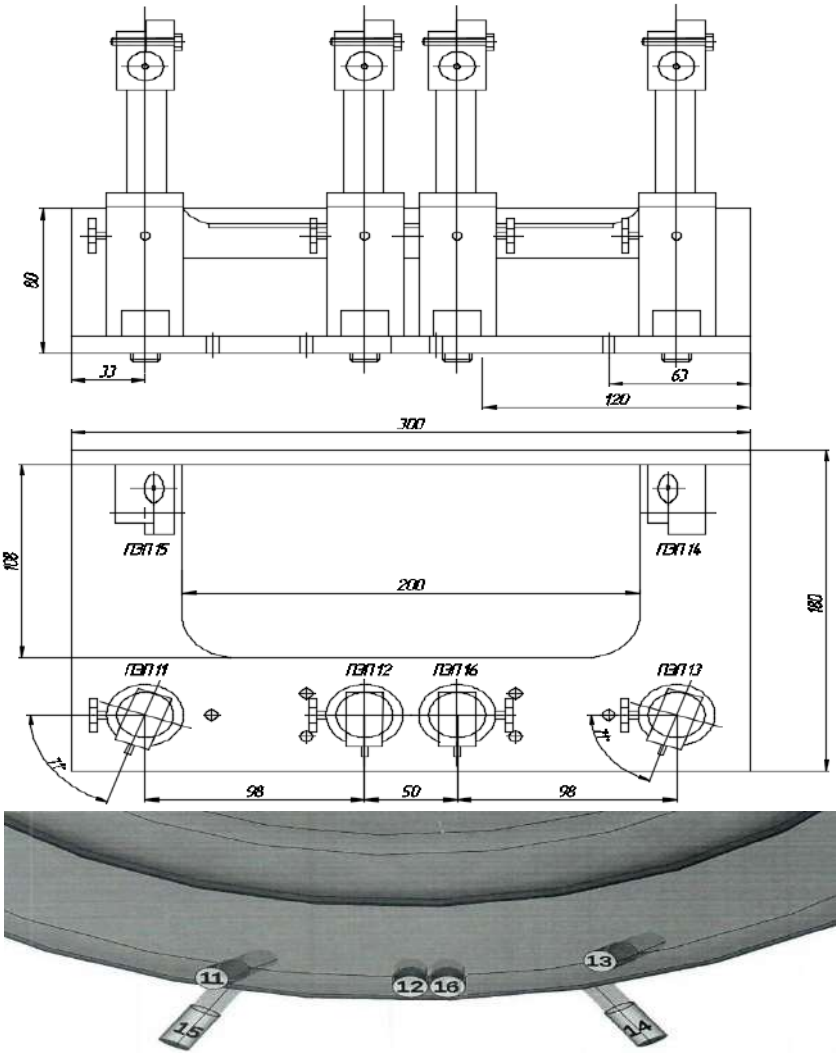


Рисунок 1 – Схема размещения ПЭП после модернизации

Тогда настройка режимов работы дефектоскопа УД2-102 в комплекте с ПЭП будет соответствовать таблице 2.

Таблица 2 – **Настройка режимов работы дефектоскопа после модернизации**

Контролируемая зона колеса, вариант метода контроля	Сечение в НО	Настройка дефектоскопа	Группа ПЭП	Угол ввода, град
Обод – DR3.1	Е–Е	11, 21	11, 21	40°
Обод – DR2.1 (5 МГц) – 15–80 мм	В–В, Г–Г	12, 22	12, 22	0°
Обод – DR2.1 (5 МГц) – 60–130 мм	Г–Г, Д–Д	13, 23	12, 22	0°
Гребень – DR3.3	И–И	14, 24	13, 23	50°
Зона перехода обода в диск	К–К	15, 25	14, 24	–45°
	К–К	16, 26	15, 25	+45°
Обод – DR2.1 (2,5 МГц)	В–В*, Г–Г, Д–Д	17, 27	16, 26	0°
* В случае возможности отделения полезного сигнала (отраженного от отверстия) от первого отраженного от внутренней грани колеса; – группа ПЭП 11, 12, 13, 14, 15, 16 являются датчиками левой ванны; – группа ПЭП 21, 22, 23, 24, 25, 26 – правой ванны.				

Группу ПЭП 16, 26 (настройка 17, 27) используют в случае появления ложных сигналов при контроле зоны обода колеса по варианту DR2.1 при использовании частоты 5 МГц.

Если рассматривать создание этапов в программе «СУДКП Регистратор» при применении одноканального дефектоскопа или двух одноканальных по существующей технологии на сегодняшний день, то они будут соответствовать рисунку 2.

а)



б)

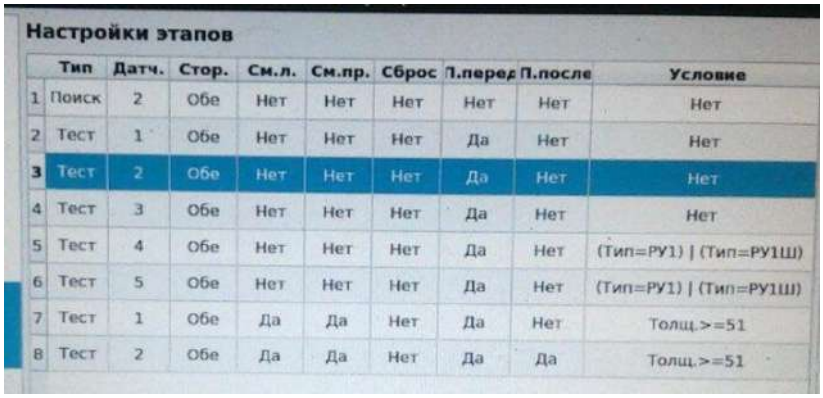


Рисунок 2 – Настройки этапов при применении одного одноканального дефектоскопа (*а*) или одновременно двух одноканальных (*б*)

После модернизации редактирование этапов дефектоскопии производится в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3 – **Настройка этапов в программе «СУДКП Регистратор» (один одноканальный дефектоскоп)**

Номер этапа	Состояние	Условие и описание работы	ПЭП	Сторона стенда	Настройки дефектоскопа
Один одноканальный дефектоскоп					
1	Поиск	Подвод каретки на расстояние 50 мм	12	Левая	10
2	Тест	Сканирование 1 датчиком	11	Левая	11
3	Тест	Сканирование 2 датчиком (зона № 1)	12	Левая	12
4	Тест	Сканирование 2 датчиком (зона № 2)	12	Левая	13
5	Тест	Сканирование 3 датчиком	13	Левая	14
6	Тест	Сканирование 4 датчиком	14	Левая	15
7	Тест	Сканирование 5 датчиком	15	Левая	16
8	Тест*	Сканирование 6 датчиком	16	Левая	17
9	Тест**	Сканирование 1 датчиком	11	Левая	11
10	Тест**	Сканирование 2 датчиком (зона № 1)	12	Левая	12
11	Тест**	Сканирование 2 датчиком (зона № 2)	12	Левая	13
12	Поиск	Подвод каретки на расстояние 50 мм	22	Правая	22
13	Тест	Сканирование 1 датчиком	21	Правая	21
14	Тест	Сканирование 2 датчиком (зона № 1)	22	Правая	22
15	Тест	Сканирование 2 датчиком (зона № 2)	22	Правая	23
16	Тест	Сканирование 3 датчиком	23	Правая	24
17	Тест	Сканирование 4 датчиком	24	Правая	25
18	Тест	Сканирование 5 датчиком	25	Правая	26
19	Тест*	Сканирование 6 датчиком	26	Правая	27
20	Тест**	Сканирование 1 датчиком	21	Правая	21
21	Тест**	Сканирование 2 датчиком (зона № 1)	22	Правая	22
22	Тест**	Сканирование 2 датчиком (зона № 2)	22	Правая	23
Два одноканальных дефектоскопа					
1	Поиск	Подвод каретки на расстояние 50 мм	12	Обе	10
2	Тест	Сканирование 1 датчиком	11, 21	Обе	11, 21
3	Тест	Сканирование 2 датчиком (зона № 1)	12, 22	Обе	12, 22
4	Тест	Сканирование 2 датчиком (зона № 2)	12, 22	Обе	13, 23
5	Тест	Сканирование 3 датчиком	13, 23	Обе	14, 24
6	Тест	Сканирование 4 датчиком	14, 24	Обе	15, 25
7	Тест	Сканирование 5 датчиком	15, 25	Обе	16, 26
8	Тест*	Сканирование 6 датчиком	16, 26	Обе	17, 27
9	Тест**	Сканирование 1 датчиком	11, 21	Обе	11, 21
10	Тест**	Сканирование 2 датчиком (зона № 1)	12, 22	Обе	12, 22
11	Тест**	Сканирование 2 датчиком (зона № 2)	12, 22	Обе	13, 23
*В данном случае контроль производится дополнительно ПЭП № 16 и 26. **Включается при толщине обода ≥ 51 мм.					

Следует отметить, что существенным конструктивным недостатком стенда СУДКП является размещение привода вращения КП с внешней приободной зоны колеса (рисунок 3).



Рисунок 3 – Привод вращения со стороны внешней приободной зоны колеса при текущем ремонте КП

Такое расположение технически неизбежно приводит к тому, что в процессе УЗ-контроля в иммерсионную ванну попадают загрязнения: остатки смазочных материалов, технологическая грязь, окалина, цементные отложения и т. д. Дополнительно неудобство создаёт УЗ-контроль КП с криволинейными дисками, при котором необходимо заменить ролик вращения на специализируемый по причине отсутствия контакта в приободной зоне.

Всё это не только снижает качество акустического контакта и точность дефектоскопии, но и требует дополнительных затрат времени на внеплановую очистку ванны, замену роликов в зависимости от формы диска КП, что уменьшает коэффициент полезного использования оборудования.

Предлагается установить привод вращения в контакте с внутренней стороной обода колеса, т. к. данная зона не подвержена загрязнениям и характеризуется идентичностью геометрических параметров для всего парка КП (независимо от типа и кривизны диска колеса) и защищена от интенсивного налипания эксплуатационных загрязнений, что повышает надёжность работы приводного механизма (рисунок 4).

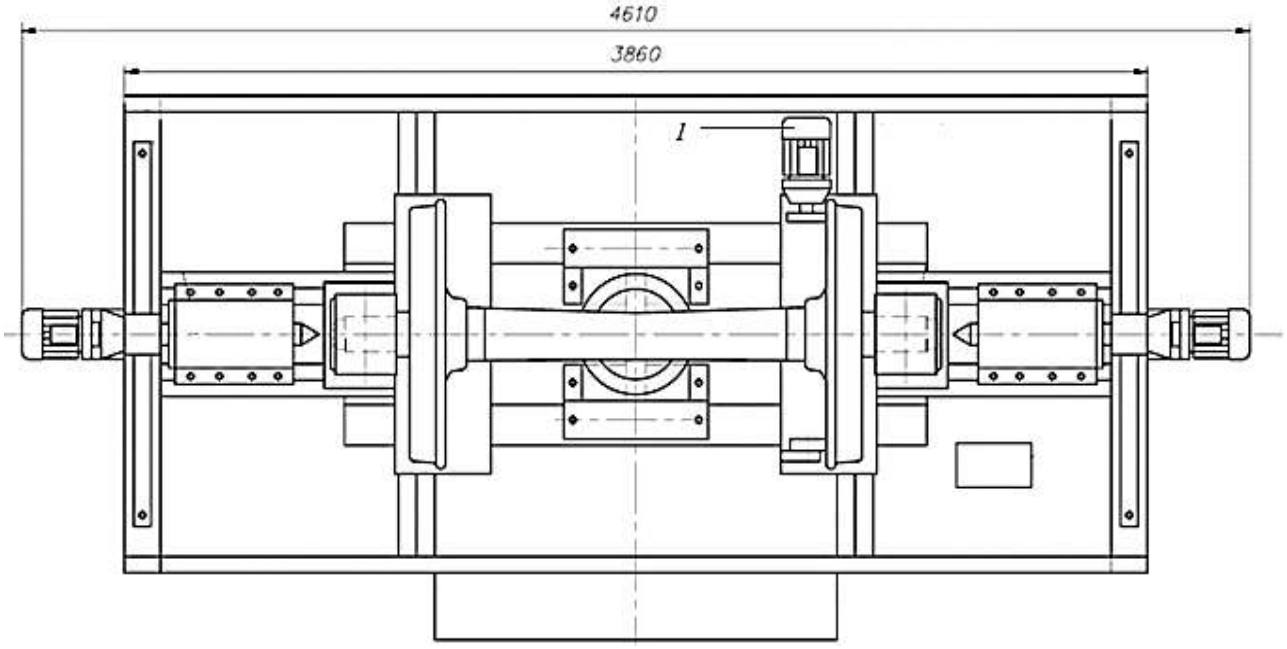


Рисунок 4 – Общий вид стенда СУДКП после модернизации привода вращения:
1 – мотор-редуктор вращения КП

В заключение можно сказать, что модернизация стенда, заключающаяся в изменении технологии УЗ-контроля с добавлением дополнительного шестого датчика в левую и правую ванны, позволит повысить качество дефектоскопии как при автоматическом контроле, снижая вероятность появления ложных индикаций, так и при настройке браковочной чувствительности в ручном режиме. Исполнение привода вращения со стороны внутренней грани обода колеса позволит избежать падение чувствительности контроля из-за возможных загрязнений технической воды, способствуя повышению коэффициента технического использования стенда.

Список литературы

1 **Отока, А. Г.** Повышение эффективности иммерсионного ультразвукового контроля ободьев цельнокатаных колёс при плановых видах ремонта колёсных пар подвижного состава / А. Г. Отока, О. В. Холодилов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2024. – № 1 (81). – С. 94–102.

УДК 629.4.027.5:620.179.141

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ СВОБОДНЫХ ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

А. Г. ОТОКА, О. В. ХОЛОДИЛОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

И. П. КОРОТКЕВИЧ
Белорусская железная дорога, г. Могилев

В настоящее время на железной дороге начинают предъявляются более высокие требования к качеству, долговечности и надежности осей колесных пар (КП) в эксплуатации. Это связано с последовательным повышением эксплуатационной эффективности и масштабным обновлением парка железнодорожного подвижного состава нового поколения.

Достоверность и объективность контроля поверхностных и внутренних дефектов осей имеет огромное значение для их долгой безотказной эксплуатации.

Оси КП всегда подвергались магнитопорошковому контролю (МПК) на предмет выявления поверхностных дефектов в виде трещин и волосовин. Контроль свободных вагонных осей, находящихся в эксплуатации, производится на этапе капитального ремонта, после снятия деталей и составных частей буксового узла и распрессовки цельнокатаных колес в соответствии с правилами по неразрушающему контролю [1]. Выявлению подлежат поперечные и наклонные трещины в различных частях оси, а также разрушение напиленного слоя восстановленной шейки. При изготовлении осей контроль качества поверхности на наличие дефектов проводят магнитопорошковым методом по ГОСТ 33200-2014, где в разделе «Методы контроля» указывается контроль способом приложенного поля с уровнем чувствительности «Б» по ГОСТ 21105-87. При этом ориентация дефектов не уточняется. Если рассматривать подссылочный ГОСТ 21105-87, то в нем речь идет о возможных видах, способах и схемах намагничивания.

Поэтому к комбинированному намагничиванию свободных осей в принципе никаких требований не предъявляется. Однако с выходом ГОСТ 34656-2020 появились требования к методам, средствам и порядку проведения НК при контрольных испытаниях осей КП железнодорожного подвижного состава, изготовленных по ГОСТ 33200-2014.

Новые требования к МПК чистовых осей исключают применение только одного вида намагничивания. Контроль должен выполняться исключительно с использованием комбинированной схемы намагничивания либо путем последовательного сочетания циркулярного и полюсного намагничивания. Такие изменения привели к разработке проекта нового стандарта (разработчик АО «ВНИИЖТ») взамен ГОСТ 33200-2014, где на сегодняшний день откорректированы эти требования, но с возможностью предоставления выбора. Так, в доработанной окончательной редакции настоящего проекта ГОСТ (26 мая 2026 г. состоялось согласительное совещание по доработанной окончательной редакции проекта ГОСТ 33200) говорится, что контроль качества поверхности чистовых осей магнитопорошковым методом проводится способом приложенного поля с уровнем чувствительности «Б» по ГОСТ 21105 с учетом требований ГОСТ ISO 9934-1-2021, ГОСТ ISO 9934-2-2021 и ГОСТ ISO 9934-3-2021 или в соответствии с ГОСТ 34656-2020 (подраздел 6.4). Вместе с тем появилось понятие *индикации продольной и поперечной ориентации*. Так, *индикацию считают продольной, если ее отклонение от образующей оси КП составляет менее 10°*, *индикацию считают поперечной, если ее отклонение от образующей оси колесной пары равно или более 10°*.

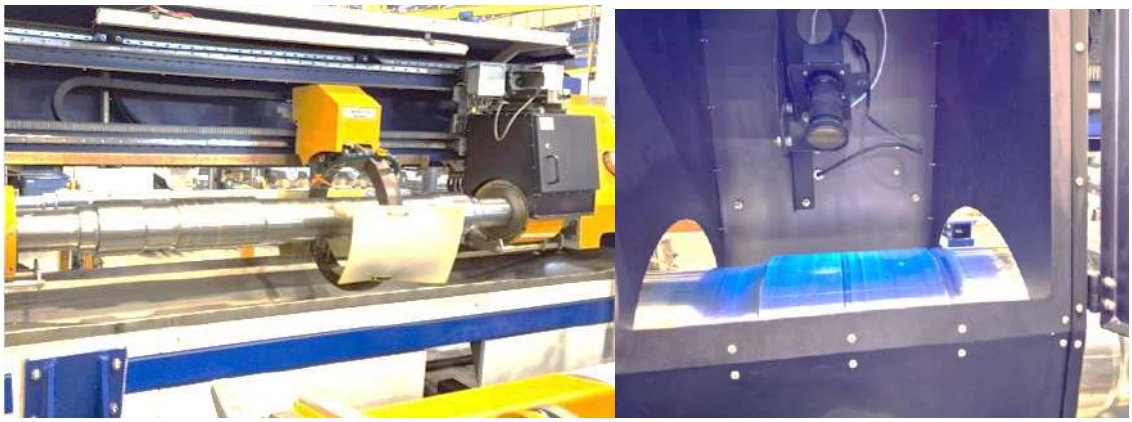
Вышеизложенное подтверждает планомерное внедрение комбинированного намагничивания – в первую очередь на этапе производства. Наглядным доказательством этого процесса служит обновление парка магнитопорошкового оборудования на предприятиях.

Оборудование МПК, представленное на рисунке 1, представляет собой комбинированное намагничивание в виде циркулярного намагничивания путем пропускания тока по всей оси и продольного – за счет пропускания тока по соленоиду.

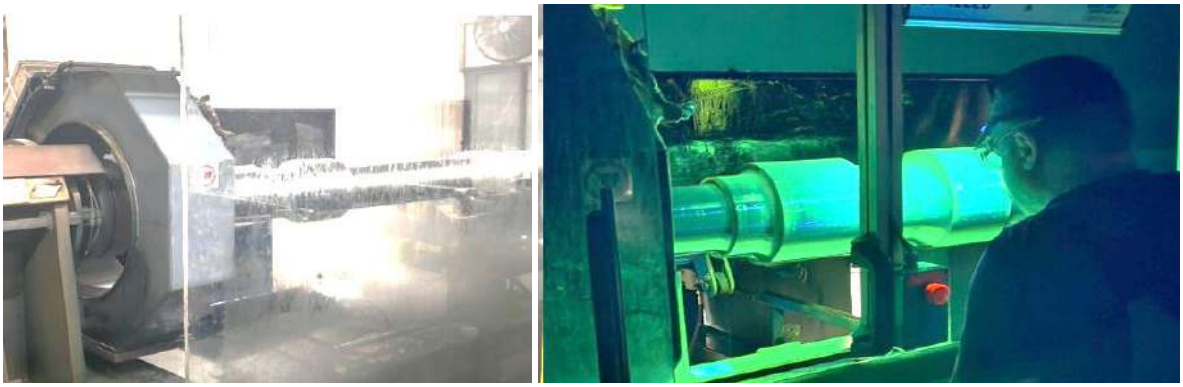
а)



б)



в)



г)



Рисунок 1 – Применение комбинированного намагничивания на практике на примере контроля свободных осей при изготовлении для различного подвижного состава:
а – дефектоскоп магнитопорошковый МД-12ПС и устройство намагничивающее импульсное УНИ-2000/4000 (контроль магнитопорошковых индикаций визуально, ручной режим, цветной метод); *б* – дефектоскоп специализированный «Магнитоскоп-О» (контроль магнитопорошковых индикаций с помощью видеосистемы, автоматизированный режим, люминесцентный метод); *в* – дефектоскоп специализированный DELTA FLUX (контроль магнитопорошковых ндикаций визуально, автоматизированный режим, люминесцентный метод); *г* – дефектоскоп магнитопорошковый CJW-3000Z (контроль магнитопорошковых индикаций визуально, автоматизированный режим, люминесцентный метод)

На рисунке 1, *а* для циркулярного намагничивания импульсный ток проходит по контактным пластинам, которые фиксируются к торцу оси в зависимости от ее типа зажимными устройствами с помощью болтового соединения. Продольное намагничивание происходит за счет намагничивания седлообразным соленоидом. Отличительной особенностью является трудоемкий контроль по участкам: для дефектоскопа МД-12ПС ось разбивается на три протяженные области по всей длине и для обеспечения сплошного контроля по периметру ось последовательно поворачивают на угол 120°. Контроль ведется дефектоскопистом со стороны только зоны достаточной намагниченности путем распыления суспензии из распылителя или полива из емкости вручную.

На рисунке 1, *б* МПК представляет замкнутый автоматизированный цикл, где ось вращается и одновременно происходит намагничивание по контактным площадкам зажимных пинолей левой и правой бабки и по соленоиду с внутренним диаметром 500 мм. Для намагничивания оси используется для двух видов намагничивания переменный ток частотой 50 Гц. Подача суспензии осуществляется в центр соленоида. Фиксация магнитопорошковых индикаций ведется автоматически после намагничивания с помощью видеокамеры. На экран последовательно выводится отсканированная поверхность оси. После завершения осмотра, отсканированное изображение всей поверхности оси попадает в основную часть программы, после чего можно просмотреть все дефекты при наличии и сформировать отчет в электронном виде.

На рисунке 1, *в* показана технология, аналогичная представленной на рисунке 1, *б*, но контроль за магнитопорошковыми индикациями остается за человеком.

На рисунке 1, *г* намагничивание оси производится за счет стационарного соосного размещения десяти разъемных катушек и пропускания тока по всей оси. По сути, ось вращается, а соленоиды остаются неподвижны: тангенциальная составляющая магнитного поля обеспечивается за счет достаточной зоны намагничивания с каждой стороны катушки. В отличие от нанесения суспензии в соответствии с рисунком 1, *б, в*, где полив происходит за счет патрубков, расположенных на движущемся соленоиде, в данном случае за счет большого количества жестко закрепленных патрубков происходит обильное смачивание суспензией по всей поверхности оси.

Для настройки и оценки параметров средств МПК осей колесных пар применяют искусственные дефекты (ИД) с уже известными геометрическими параметрами. Искусственные дефекты применяются для ежесменной проверки работоспособности средств МПК соответствующих деталей путем проведения МПК настроечного образца (НО) или контрольного образца (КО).

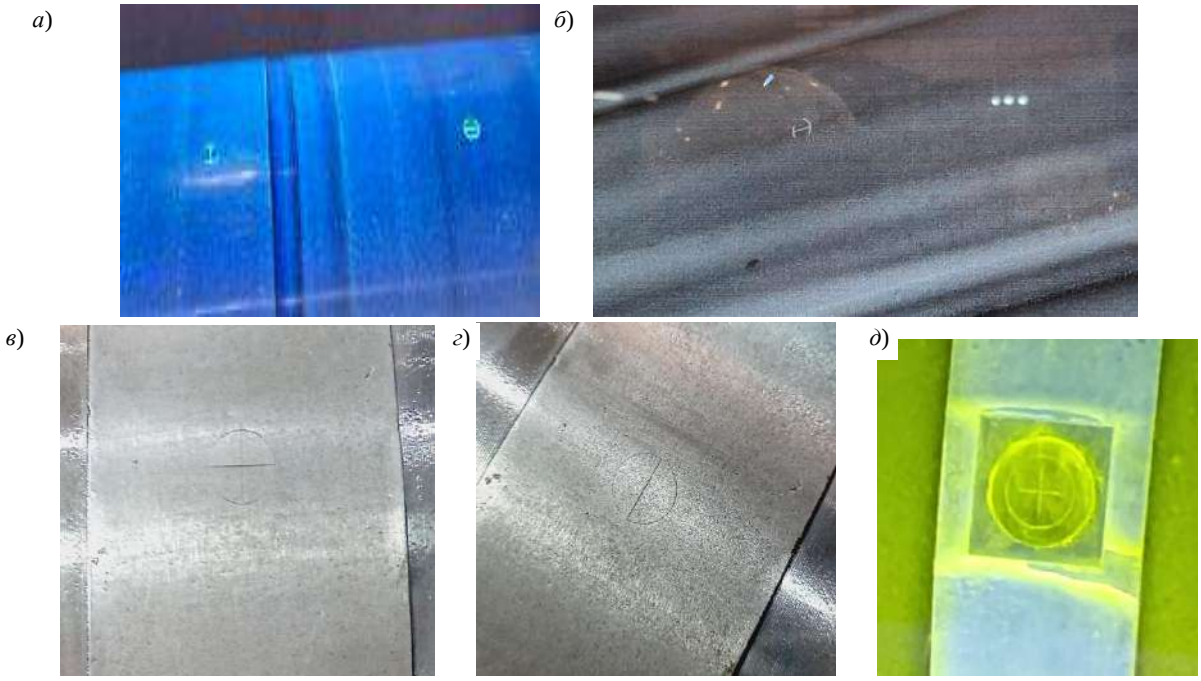


Рисунок 2 – Проверка работоспособности МПК на НО (КО) при комбинированном намагничивании осей КП:
а – фиксация скопления МП на одиночных вставках с ИД в оси в УФ (длина индикаций 6 мм, ширина раскрытия 0,01 мм); *б* – фиксация скопления МП на тех же вставках с ИД с помощью видеокамеры; *в, г* – фиксация скопления МП при дневном свете на вставке с ИД различной ориентации, настроечный образец (длина индикаций 10 мм, ширина раскрытия 0,01 мм); *д* – фиксация скопления МП на клеющейся пластинке в УФ, представляющей собой количественно-качественный индикатор (длина индикаций 5 мм, ширина раскрытия 0,01 мм)

С их помощью можно убедиться в установлении правильного направления магнитного поля и его величины, которые обеспечивают четкое появление индикаций над дефектами.

В странах СНГ на железной дороге широко применяют НО со вставками, на которых имеются ИД. Настроечный образец представляет фрагмент части оси, который фиксируется в требуемой части подготовленного паза оси, служащей для настройки и оценки параметров средств МПК (см. рисунок 2, *в, г*). Для автоматизированных средств также пользуется популярностью изготовление вставок с ИД непосредственно на поверхности оси (см. рисунок 2, *а, б*).

Для оценки качества технологий МПК в других странах применяют количественно-качественные индикаторы (см. рисунок 2, *д*). Такие индикаторы представляют собой КО из низкоуглеродистой стали с искусственными дефектами.

В заключение можно сказать, что переход к комбинированному намагничиванию связан с появлением трещин различной ориентации и применения продольного намагничивания применительно к выявлению продольных дефектов в данном случае недостаточно. На практике имеют место выявление продольных трещин с помощью соленоида, однако такие факты носят, скорее всего, случайный характер [2]. Таким образом, обеспечение достоверности результатов неразрушающего контроля определяется, в первую очередь, техническим уровнем используемого оборудования и качественными характеристиками применяемых дефектоскопических материалов. Закрепление комбинированного намагничивания в скором времени может коснуться не только осей при изготовлении, но и бывших в эксплуатации (в частности, при капитальном ремонте КП).

Список литературы

1 **ПР НК В.2** Правила неразрушающего контроля деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте. Специальные требования : утв. Советом по ж.-д. трансп. государств – участников Содружества, протокол от 19–20 ноября 2013 года № 59. – 2013. – 86 с.

2 **Отока, А. Г.** Атлас фотографий трещин, выявленных в объектах железнодорожного назначения различными методами неразрушающего контроля : справ. / А. Г. Отока, О. В. Холодилов. – Гомель : БелГУТ, 2025. – 74 с.

УДК 629.4:620.179.141:621.65

ПОДКОНТРОЛЬНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ МОБИЛЬНОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ ВАГОНОВ

А. Г. ОТОКА, О. В. ХОЛОДИЛОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель
Д. Л. ЧЕПИК
ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Республика Беларусь

На предприятиях вагонного и локомотивного хозяйств железной дороги широкое распространение получил мокрый метод нанесения суспензии при проведении магнитопорошкового контроля (МПК), т. к. он обладает высокой чувствительностью к поверхностным дефектам. При использовании данного метода магнитная суспензия наносится на контролируемую поверхность методом распыления либо полива слабой струей, не вызывающей смывания порошка, осевшего над дефектом.

В практике МПК выбор способа нанесения магнитопорошковой суспензии (МПС) является определяющим фактором, который влияет не только на выявляемость дефектов, но и на технико-экономические показатели процесса контроля.

С точки зрения расхода индикаторных материалов оба метода имеют принципиально разные механизмы потерь:

− полив характеризуется высокой локальной плотностью подачи жидкости, что приводит к критическому перерасходу основы и самого порошка, что требует обязательной организации замкнутого цикла (сборных поддонов и систем фильтрации/перемешивания) для повторного использования стекающей суспензии. В противном случае затраты на материалы становятся разорительными;

− распыление экономичнее полива по общему объему жидкой фазы, но имеет специфические технологические потери индикатора. Из-за конструктивных особенностей всасывающей трубки

пульверизатора на дне бачка всегда остается часть неиспользованной суспензии. Магнитный порошок склонен быстро осаждаться на дне ёмкости пульверизатора, в результате чего из сопла сначала вылетает слишком концентрированная смесь (перерасход порошка), а затем практически чистая дисперсионная среда (расход впустую без выявления дефектов). Из-за частого засорения форсунки севшими частицами требуется регулярная продувка системы, при которой материал выбрасывается вхолостую. Также стоит упомянуть, что мелкодисперсная струя распыления сильно подвержена влиянию сквозняков. Значительная часть взвеси уносится воздушными потоками в вентиляцию или оседает на окружающих предметах. Это говорит о том, что обеспечить равномерное смачивание поверхности объектов контроля на 100 % при МПК затруднительно. При этом с точки зрения безопасности труда требуется защита дыхания из-за высокой концентрации опасного магнитного аэрозоля в воздухе, в то время как при поливе нет взвеси в воздухе.

Поэтому существенным недостатком полива является расход суспензии, который можно устранить на любых участках дефектоскопии с помощью сливных поддонов и применения насосных станций. Для практической реализации данного метода нами была разработана мобильная насосная станция [1].

На базе Гомельского вагонного депо РУП «Гомельское отделение БелЖД» был изготовлен прототип мобильной насосной станции зав. № 001 (рисунок 1). Внедрение предложенной конструкции насосной станции при проведении МПК на участках дефектоскопии имело целью повысить объем ремонта деталей и узлов ПС за счет рециркуляции магнитной суспензии и при этом обеспечить качество МПК благодаря снижению субъективного фактора и расхода магнитного индикатора, сокращению времени на приготовление и сбор магнитной суспензии, оптимизации процесса контроля.

Разработанная передвижная суспензионная система представляет собой мобильную насосную станцию, выполненную в виде тележки с установленным на ней технологическим оборудованием. Конструкция станции включает накопительный суспензионный бак объемом не менее 50 л, насос подачи суспензии, электродвигатель перемешивающего устройства, пульт управления, распылительное устройство, трубопроводы подачи суспензии и ходовую часть с поворотными колесами.

Особенностью станции является наличие сливного отверстия для залива и стекания магнитной суспензии самотеком в накопительный бак по гибкому шлангу от стационарного сливного поддона, а также вилки питания от сети 220В, что обеспечивает адаптивность ее на любом рабочем месте участка дефектоскопии. При перемещении станции сливное отверстие наглухо закрывается резьбовой пробкой.

В передней нижней части суспензионного накопительного бака установлен шаровый кран для слива отработанной магнитной суспензии.

В верхней части бака установлен электродвигатель привода мешалки, обеспечивающий поддержание магнитного порошка во взвешенном состоянии и предотвращающий выпадение его в осадок. Для подачи суспензии в зону контроля используется насос производительностью не менее 18 л/мин.

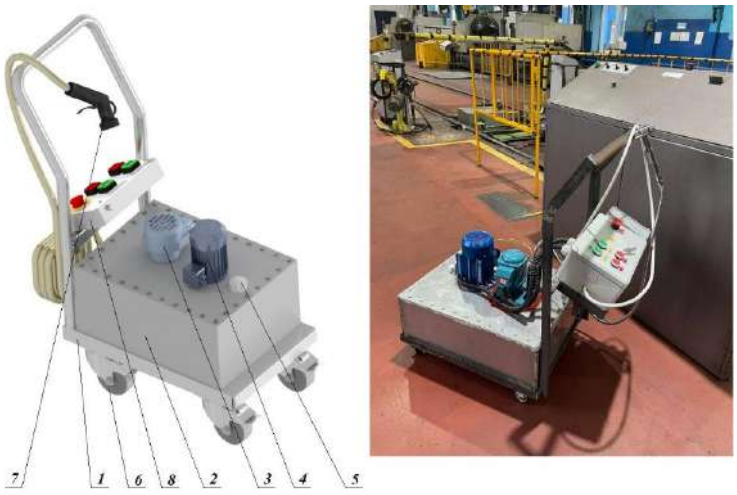


Рисунок 1 – Прототип мобильной насосной станции:
1 – каркас тележки; *2* – бак накопительный; *3* – электронасос П-50М; *4* – электродвигатель асинхронный АИР 63А4 У1 2081; *5* – пробка резьбовая; *6* – опора колесная поворотная с тормозом; *7* – лейка-распылитель с функцией полива; *8* – пульт управления

Управление работой оборудования осуществляется с помощью пульта управления, размещенного на рукоятке тележки. На пульте предусмотрены органы управления насосом и мешалкой, а также устройство аварийного отключения питания. Электропитание станции обеспечивается от розетки 220 В.

Электрическая схема управления работой станцией приведена на рисунке 2.

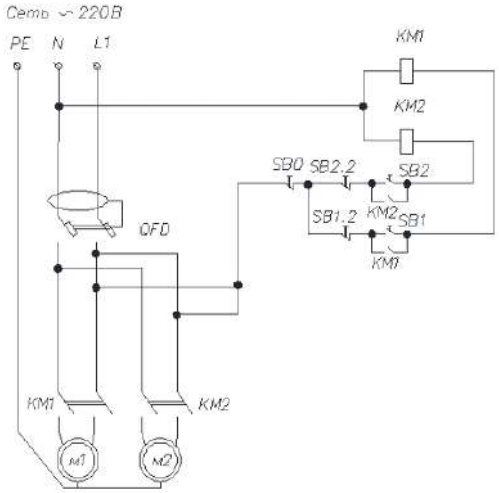


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема управления работой станцией:
M1 – двигатель мешалки; *M2* – двигатель насоса; *QFD* – вводной дифференциальный автомат;
KM1 – пускатель магнитный двигателя мешалки; *KM2* – пускатель магнитный двигателя насоса;
SB – кнопки управления; *L1* – фазный проводник; *N* – нулевой рабочий проводник;
PE – нулевой защитный проводник

Для обеспечения мобильности станции конструкцией предусмотрены четыре поворотных колеса с тормозными фиксаторами. Это позволяет перемещать оборудование между различными позициями контроля и надёжно фиксировать его в рабочем положении.

Работа станции основана на непрерывной циркуляции магнитной суспензии между накопительным баком и зоной контроля. Перед началом работы приготовленная магнитная суспензия заливается в накопительный бак. После подключения станции к сети питания включается привод мешалки, обеспечивающий перемешивание суспензии и поддержание требуемой концентрации магнитного порошка по всему объёму рабочей жидкости.

После предварительного перемешивания включается насос подачи суспензии. Через систему трубопроводов и распылительное устройство магнитная суспензия поступает на поверхность контролируемой детали в зону намагничивания. Нанесение суспензии осуществляется методом струйного полива с возможностью регулировки напора.

После стекания с поверхности детали суспензия собирается в сливной поддон и по гибкому шлангу возвращается обратно в накопительный бак станции. Таким образом реализуется замкнутый цикл циркуляции суспензии, обеспечивающий её многократное использование без необходимости постоянного приготовления новой суспензии

Для ввода оборудования в эксплуатацию, обеспечения безопасности персонала и юридической защиты как производителя, так и эксплуатирующей организации был разработан и утвержден комплект обязательной конструкторской и эксплуатационной документации [2–4].

Технические характеристики насосной станции представлены в таблице 1.

Таблица 1 – **Технические характеристики насосной станции, изготовленной в Гомельском вагонном депо (ВЧД-7)**

Габаритные размеры пульта управления (Д×Ш×В), мм	300×200×130
Напряжение питания переменного тока электродвигателя и насоса, В	220/380
Напряжение питания переменного тока розеток для станции, В	230±23
Максимальная потребляемая мощность, кВт, не более	0,4
Масса, кг, не более	55
Частота вращения электродвигателя мешалки, об/мин, не более	1310
Частота вращения электродвигателя насоса, об/мин, не более	3000
Номинальное давление на выходе из насоса, МПа	0,04
Номинальная подача, л/мин, не менее	18

Окончание таблицы 1

Глубина погружения насосной части, мм	80–200
Нагрузка на опоры колесные (поворотные), кг, не более	200
Габаритные размеры, мм, не более: – длина – ширина – высота	 900 470 1000
Емкость накопительного суспензионного бака, л, не менее	50

На основании протокола и акта о результатах подконтрольной эксплуатации [5] на базе Жлобинского вагонного депо РУП «Гомельское отделение БелЖД» подтверждены технико-экономические характеристики, в т. ч. эффективность применения станции при проведении дефектоскопии ферромагнитных деталей магнитопорошковым методом в колесно-роликовом участке (позиция дефектоскопии колесных пар вагонов) и участке УРИД (позиция дефектоскопии клиньев тягового хомута и маятниковых подвесок автосцепки СА-3). Даны рекомендации по дальнейшей эксплуатации и усовершенствованию конструкции станции.

Особенности конструкции мобильной станции в условиях ремонтных подразделений предприятий вагонного и локомотивного хозяйства позволяют применять ее в любом удобном месте для контроля различных деталей, прошедших очистку и мойку в моечной машине. При этом применение станции возможно вне зависимости от способа и вида намагничивания, а также типа используемой суспензии. Основное требование к предлагаемой системе – наличие сливного поддона с гибким шлангом на участке дефектоскопии и использование одного и того же магнитного индикатора, обеспечивающего контрастную картину на поверхности объекта контроля.

Список литературы

1 Полезная модель № 13802. Мобильная суспензионная насосная станция для магнитопорошковой дефектоскопии деталей и составных частей подвижного состава : заявл. 14.10.2024 ; заявитель и патентообладатель Белорус. гос. ун-т трансп.: № u 20240237 ; зарегистр. в Гос. реестре изобр. 15.08.2025 / Нац. центр интел. собств. – 7 с.

2 Акт приёмки мобильной суспензионной насосной станции для магнитопорошковой дефектоскопии деталей и составных частей подвижного состава зав. № 001 от 15.12.2024 / Гомельск. ваг. депо. – Гомель, 2024. – 2 с.

3 ОТЧХ.356.37.001 ПС. Паспорт. Мобильная суспензионная насосная станция для магнитопорошковой дефектоскопии деталей и составных частей подвижного состава / Гомельск. ваг. депо. – Гомель, 2024. – 4 с.

4 ОТЧХ.356.37.001 РЭ. Руководство по эксплуатации. Мобильная суспензионная насосная станция для магнитопорошковой дефектоскопии деталей и составных частей подвижного состава / Гомельск. ваг. депо. – Гомель, 2024. – 18 с.

5 ОТЧХ.356.37.001 ПМПЭ Мобильная суспензионная насосная станция для магнитопорошковой дефектоскопии деталей и составных частей подвижного состава / Гомельск. ваг. депо. – Гомель, 2025. – 10 с.

УДК 629.4.027.5:620.179.16

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ЗОНДА ДЛЯ УЛЬРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ПОЛЫХ ОСЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

А. Г. ОТОКА, О. В. ХОЛОДИЛОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель
Д. Л. ЧЕПИК
ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Республика Беларусь
А. Р. КОСАРЕВ
Брестское областное управление Госпромнадзора, Республика Беларусь

Как свидетельствуют данные отраслевой статистики, отказы осей колесных пар представляют серьезную угрозу безопасности движения, приводя к человеческим жертвам и значительным экономическим потерям, связанным с аварийными простоями и ремонтом подвижного состава (ПС). В этой связи особую актуальность приобретает совершенствование методов и средств неразрушающего контроля (НК) для своевременного выявления дефектов на ранней стадии их развития.

На основе доступной информации можно выделить несколько типов устройств сканирования (зондов) для ультразвукового (УЗ) контроля полых осей колесных пар (КП). Основное различие между ними заключается в степени автоматизации и конструктивном исполнении, которое определяется диаметром канала и требуемой производительностью.

Традиционный и наиболее простой метод заключается в том, что дефектоскопист вручную с помощью толкателя вводит зонд, подобранный по диаметру расточного отверстия, внутрь оси и вращает его, контролируя эхо-сигналы на экране дефектоскопа. Данный способ применяется при малых объемах контроля или отсутствии автоматизированных систем, что подразумевает низкую производительность и высокие требования к квалификации оператора.

Такие методы контроля, как визуальный осмотр и магнитопорошковая дефектоскопия, широко используемые в эксплуатационной практике, требуют выкатки КП и проведение комплекса демонтажных работ в зависимости от вида ремонта и технического обслуживания. Это существенно увеличивает трудоемкость и продолжительность ремонтных операций. Кроме того, многократные демонтаж и повторная сборка могут сами по себе создавать предпосылки для снижения эксплуатационной надежности КП.

Настоящая работа посвящена анализу существующих типов зондовых устройств для УЗ-контроля полых осей, их сравнительной характеристике и оценке перспектив применения для повышения достоверности, и производительности контроля в условиях эксплуатации ПС.

Действующая нормативно-техническая документация [1, 2] регламентирует применение наклонных совмещённых пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) с углом ввода 45° и рабочей частотой в диапазоне 2–4 МГц (в отдельных случаях допускается угол ввода 50° и частота ПЭП 2,5–5 МГц [3]) в качестве основного инструмента УЗ-контроля.

В соответствии с [4] в зависимости от диаметра отверстия полой оси ПЭП выбирают с различными углами ввода с частотой 4,5 МГц. Например, для полой оси с отверстием на 30 мм используется четыре ПЭП (2×37° и 2×0,5°), а для отверстий 53 мм и 90 мм – восемь ПЭП (2×37°, 2×0,5°, 2×45° и 2×70°). Различные углы ввода используются для обнаружения поперечных, продольных и объемных дефектов.

Известно устройство сканирования ШКО-ПО, предназначенное для проведения УЗ-контроля полых железнодорожных осей и валов с внутренним диаметром на 30 и 40 мм [5]. Ультразвуковой контроль проводится по всей длине оси (вала) и может осуществляться как на несформированных осях, так и на сформированных КП. Устройство сканирования устанавливается во внутреннее отверстие полой оси (вала) и осуществляет УЗ-контроль в двух противоположных направлениях (по ходу направления перемещения устройства и в противоположном). Устройства могут использоваться совместно с дефектоскопами «PELENG» («ПЕЛЕНГ») УД2-102 и УД2-102ВД или другими аналогичными одноканальными дефектоскопами.

Тем не менее конструкция зонда неоднократно подвергалась модернизации: от металлического исполнения рабочей части к полимерному с эластичными элементами по периферии, обеспечивающими герметизацию контактной среды. Факт продолжающейся конструкторской доработки косвенно подтверждает, что существующие технические решения не в полной мере удовлетворяют требованиям к стабильности акустического контакта и повторяемости результатов.

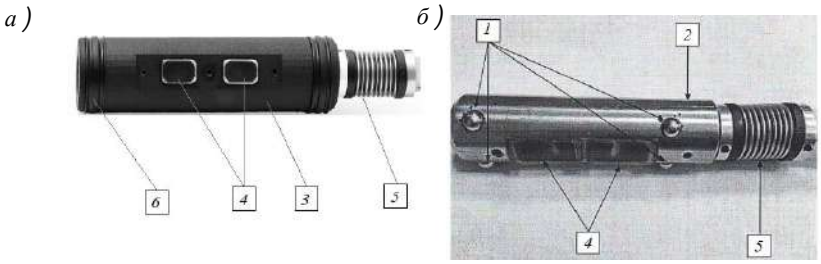


Рисунок 1 – Варианты исполнения рабочей головы зонда на примере устройства сканирования ШКО-ПО
а – из пластмассы; *б* – из металла (сталь):
1 – опоры шариковые подпружиненные; *2* – корпус стальной; *3* – корпус из пластмассы;
4 – пьезоэлектрические преобразователи; *5* – муфта пружинная; *6* – кольца уплотнительные

В соответствии с паспортом [6] производитель указывает, что гарантированный надежный акустический контакт в процессе УЗ-контроля обеспечивается при расположении ПЭП в нижней части отверстия между «4» и «8» часами, что соответствует сектору 120°. Для соблюдения этих требований необходимо разделять ось (вал) на несколько секторов и в процессе контроля осуществлять проворачивание объекта контроля. Стоит упомянуть, что стоимость данного устройства, являющегося по своей сути вспомогательным приспособлением для удержания ПЭП, к которым подается дополнительно контактная жидкость в виде индустриального масла, составляет ориентировочно ≈ 30 тыс бел. руб.

В рамках реализации программы импортозамещения нами разработан зонд для проведения УЗ-контроля полых осей электропоездов серии ЭП под диаметр сквозного отверстия на 30 мм (рисунок 2).

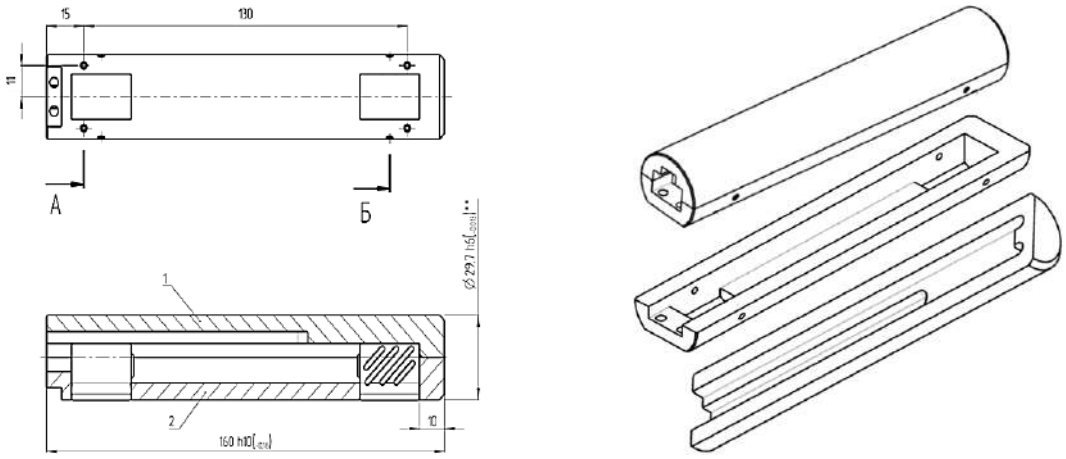


Рисунок 2 – Исполнение разборной рабочей головы зонда:
верхний (*1*) и нижний (*2*) сегменты

Рабочая «голова» зонда представляет собой разборную конструкцию, которая состоит из верхнего и нижнего сегментов. Крепление ПЭП осуществляется потайными винтами М3×0,5 с нейлоновыми наконечниками. Технологические пазы выполнены для ПЭП прямоугольной формы производства ООО «НПО “Инакон”» (Москва) с геометрическим параметрами 20,11×16,05×19,72. Контактная жидкость подается к центру рабочей головы зонда. Крепление штанги и рабочей головы осуществляется с помощью резьбового соединения.

Однако ввиду отсутствия технической возможности изготовления головы зонда с помощью станка с числовым программным управлением нами был изготовлен упрощенный прототип рабочей головы с резьбовым креплением ее к штанге (рисунок 3, *а*) посредством традиционных станков механической обработки. При этом для диаметра сквозного отверстия оси на 40 мм была предложена и изготовлена рабочая голова зонда (рисунок 3, *б*) под ПЭП круглой формы (два прямых по краям и один комбинированный наклонный в центре) с возможностью выполнять контроль при различных способах и режимах контроля.

а)



б)



Рисунок 3 – Общий вид изготовленной рабочей головы зонда для различных полых осей колесных пар моторвагонного подвижного состава:
а – рабочая голова для отверстия диаметром 30 мм (с подачей контактной жидкости и жесткой фиксацией двух наклонных ПЭП частотой 5 МГц и углом ввода 50°, совмещенный режим, эхо-метод);
б – рабочая голова для отверстия диаметром 40 мм (без подачи контактной жидкости и подпружиненными тремя ПЭП частотой 2,5 МГц и углом ввода 0° и 42°, раздельный режим, дельта-метод

Ориентировочная стоимость изготовленных зондов не превышает 3 тыс. бел. руб., что в 10 раз меньше при их приобретении по коммерческим предложениям сторонних организаций.

Следующим этапом для проверки чувствительности зондов необходимо было спроектировать и изготовить специализированные настроечные образцы (НО). В качестве базового искусственного отражателя был выбран боковой цилиндрический отражатель диаметром 6,0 мм, расположенный на глубине 44 мм от поверхности ввода. Указанные параметры соответствуют геометрии стандартного образца СО-2 и выбраны для обеспечения единства измерений при настройке глубиномера устройства.

НО были выполнены из стали марки ОсВ. Конфигурация образцов (рисунок 4) предусматривает наличие на донной поверхности поперечных и наклонных насечек (зарубок), моделирующих трещиноподобные дефекты различной протяженности по глубине. Поверхность ввода ультразвуковых колебаний обоих образцов выполнена цилиндрической с радиусом кривизны R = 20 мм. При этом донная поверхность для образца ОТКХ-40 № 2 выполнена плоской, тогда как для образца ОТКХ-40 № 1 – цилиндрической с радиусом R = 95 мм.

Выбор геометрических параметров НО осуществлялся исходя из анализа типоразмерного ряда колесных пар, превалирующих в практике эксплуатационного контроля. Применение в качестве искусственных дефектов насечек (зарубок) обусловлено их апробированной эффективностью для адекватной имитации поверхностных трещин реальных объектов. При этом главным критерием являлось удовлетворение требований их геометрических размеров: высота h и ширина b насечки должны превышать длину волны λ УЗ в материале, а отношение h/b должно находиться в интервале от 0,5 до 4,0. В рамках настоящего исследования насечки выполнялись на полную ширину образца, что позволяет классифицировать их как протяженные (двумерные) дефекты при акустическом тракте контроля.

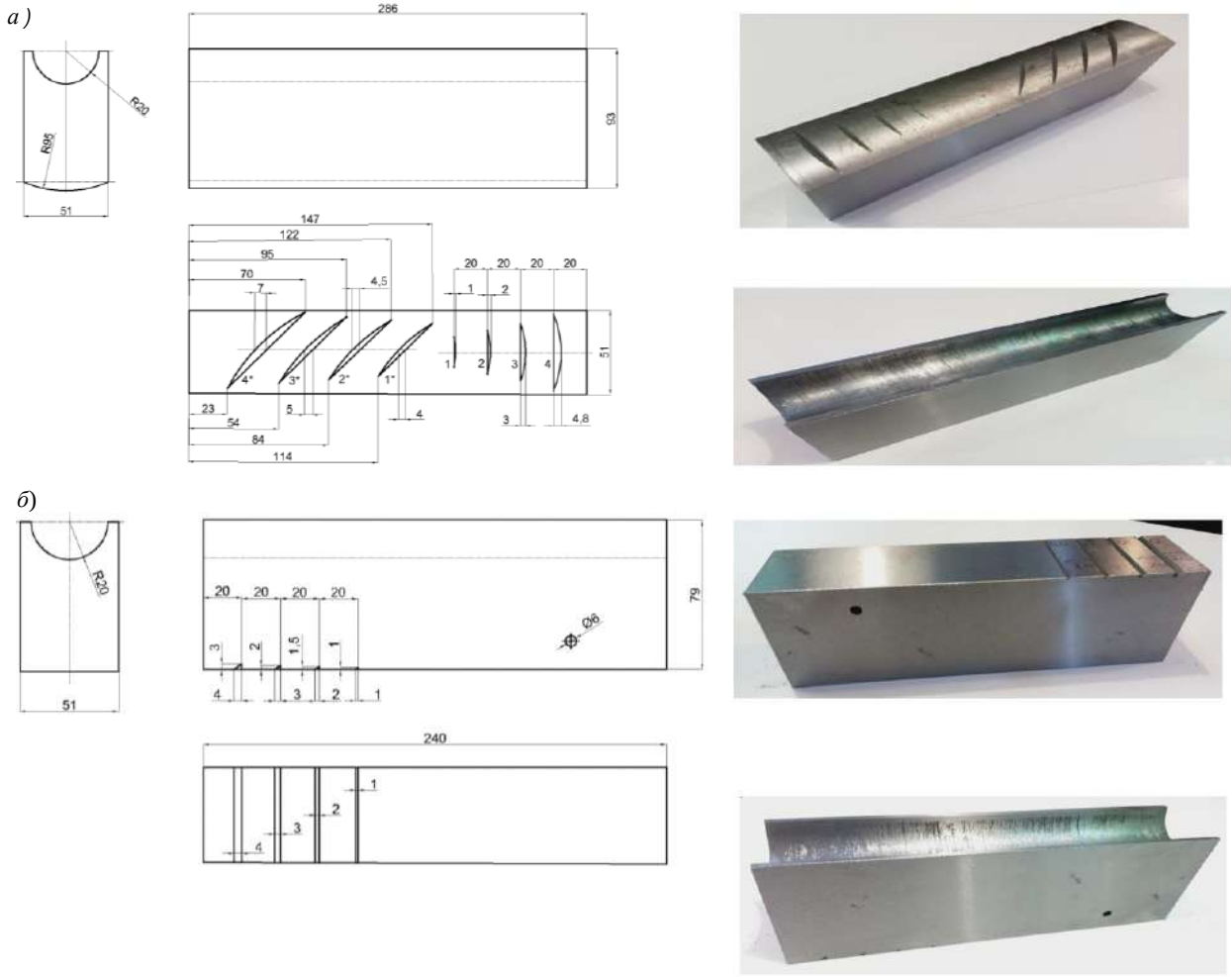


Рисунок 4 – Общий вид НО ОТКХ-40 № 1 (*а*), ОТКХ-40 № 2 (*б*)

В ходе экспериментальной апробации УЗ-зондов в комплекте с дефектоскопом УД2-102 «Пеленг» была установлена их высокая работоспособность и адаптивность применительно к различ-

ным схемам контроля на НО. Поэтому дальнейшие исследования будут связаны с проведением сравнительного анализа чувствительности контроля разработанных зондов с зондами компании «Алтек» в зависимости от применяемой схемы и режима контроля. Особое внимание предполагается уделить наклонным отражателям, т. к. их выявление на практике вызывает особое затруднение.

Список литературы

1 **Отока А. Г.** Ультразвуковой контроль полых осей колёсных пар электропоездов серии ЭП / А. Г. Отока, О. В. Холодилов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2023. – № 4. – С. 22–28.

2 DIN 27201-7 Zustand der Eisenbahnfahrzeuge – Grundlagen und Fertigungstechnologien – Teil 7: Zerstörungsfreie Prüfung / H. Hintze, U. Börner // Deutsche Bahn. – Brandenburg : Kirchmöser, 2006. – 6 p.

3 Методика проведения ультразвукового контроля полых осей электропоездов ЭП. – Минск, 2024. – 48 с.

4 Ultrasonic hollow axles inspection system (HPS): Inspection of wheel set axles with longitudinal bore. URL: https://www.izfp.fraunhofer.de/en/produkte-dienstleistungen/Produkte/HPS.html (date of access: 07.08.2026).

5 ДШЕК.415119.001 ПС Паспорт. Устройство сканирования ШКО-ПО 30 / ШКО-ПО 40 для ультразвукового контроля полых осей и валов. – СПб., 2024. – 15 с.

6 Устройство для сканирования полых осей ШК-ПО 40. – URL: https://www. altek.ru/catalog/ustroystva_ skanirovaniya/ustroystvo_dlya_skanirovaniya_polykh_osey _shk_po_40 (дата обращения: 07.08.2026).

УДК 629.4.027.2

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТЕЛЕЖЕК ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ (РАМ И НАДРЕССОРНЫХ БАЛОК) ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

М. И. ПАСТУХОВ, Е. Н. КОНОВАЛОВ, Р. И.ЧЕРНИН, П. М. АФАНАСЬКОВ, К. А. ЕМЕЛЬЯНОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Актуальность поставленной задачи исследований продиктована нехваткой ходовых частей пассажирских вагонов и, в частности, пассажирских вагонов специального назначения (путевых машинных станций, восстановительных и пожарных аварийно-спасательных поездов). Для повышения эффективности использования имеющегося подвижного состава, не прибегая к новым закупкам, проведена научно-исследовательская работа по оценке остаточного ресурса пассажирских вагонов локомотивной тяги, а также тележек пассажирских (рам и надрессорных балок) с целью обоснования возможности продления их срока службы свыше полуторного, но не более двойного, установленного заводом-изготовителем. Программа исследований включала следующие этапы:

– отбор тележек (рам и надрессорных балок) типовых представителей и оценка их технического состояния;

– корректировка расчетных схем и выполнение прочностных расчетов с учетом фактического технического состояния металлоконструкций;

– изготовление образцов и определение химического состава и основных физико-механических характеристик материалов несущих конструкций тележек (предел выносливости, предел прочности, относительное удлинение, ударная вязкость);

– принятие решения о возможности дальнейшей эксплуатации тележек по истечении полуторного срока службы.

Для реализации поставленной задачи на предприятиях Белорусской железной дороги были отобраны три тележки (типовые представители модели КВЗ-ЦНИИ-I), имеющие срок эксплуатации 42 года и более. Учитывая тот факт, что при отборе типовых представителей тележек (рам и надрессорных балок) основным критерием был срок службы, на начальном этапе оценено их техническое состояние для определения целесообразности проведения дальнейших работ. Контроль технического состояния показал, что все три тележки имеют характерные коррозионные повреждения, оказывающие существенное влияние на остаточный ресурс. Для продолжения работы необходимо было осуществить мероприятия по восстановлению утраченного ресурса. Восстановление ресурса было проведено в соответствии с ранее разработанным проектом конструкторской документации [1] путем постановки в местах коррозии усиливающих ремонтных накладок на ЗАО «Гомельский ВСЗ».

На следующем этапе выполнена корректировка расчетных схем с учетом конструктивных изменений и проведены прочностные расчеты для определения наиболее нагруженных зон элементов метал-

локонструкции, а также определения мест установки тензорезисторов при проведении стендовых усталостных испытаний. Расчеты на прочность рам тележек КВЗ-ЦНИИ-I показали, что максимальные напряжения возникают в верхних и нижних горизонтальных листах продольных боковых балок (коэффициент перегрузки до 0,79) и в вертикальных листах средних поперечных балок (коэффициент перегрузки до 0,48). В верхних и нижних горизонтальных листах средней части продольных боковых балок в эксплуатации возникают наибольшие циклические знакопеременные нагрузки. Расчеты на прочность надрессорных балок тележек КВЗ-ЦНИИ-I показали, что максимальные напряжения находятся практически на одном уровне по всем конструктивным элементам металлоконструкции надрессорных балок (коэффициент перегрузки до 0,84): опорная плита, вертикальные листы, верхние и нижние листы и опоры скользунов. Таким образом, проведенные в рамках данного этапа работы исследования указывают на то, что металлоконструкции тележек имеют запас прочности, однако не позволяют дать оценку их остаточного ресурса.

Для оценки и определения остаточного ресурса проведен комплекс испытаний. Сравнительный анализ химического состава исследуемого материала, полученного при испытаниях, и состава стали СтЗ, регламентируемого п. 4.1 и таблицей 1 ГОСТ 380-2005, указывает на то, что элементы рамы тележки и надрессорной балки изготовлены из стали, химический состав которой соответствует стали углеродистой обыкновенного качества марки СтЗсп [2].

Предел выносливости получен по результатам испытаний образцов вырезанных из материала элементов тележек и составил 215 МПа. Для стали СтЗсп с пределом прочности 425 МПа характерен предел выносливости 150 МПа [2]. Таким образом, можно видеть, что полученные результаты сопоставимы.

Согласно требованиям [3] несущая способность рам и надрессорных балок тележек пассажирских вагонов определяется коэффициентом запаса сопротивления усталости, который определяется зависимостью

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,э}} \geq 2{,}0, \qquad (1)$$

где $\sigma_{a,N}$ – предел выносливости для исследуемой зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов $N_0 = 10^7$; $\sigma_{a,э}$ – величина амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенная к базовому числу циклов N_0 и эквивалентная повреждающему воздействию эксплуатационных напряжений за расчетный срок службы.

Результаты проведенных ходовых испытаний и выполненной расчетно-экспериментальной оценки показали, что рамы и надрессорные балки тележек двухосных пассажирских вагонов после длительной эксплуатации удовлетворяет действующим требованиям в части соответствия прочности по коэффициенту запаса сопротивления усталости (минимальное значение $n = 2{,}1$) [2].

Испытания на сопротивление усталости рам и надрессорных балок тележек проводились с целью оценки основных несущих узлов их конструкции по критерию сопротивления усталости с обоснованием величины остаточного срока службы, а также проверки соответствия показателей сопротивления усталости исследуемой конструкции. Схемы нагружения при испытаниях на сопротивление усталости для конструкции тележек учитывали характер нагружения рам и надрессорных балок тележек в эксплуатации. Выполненный комплекс стендовых ресурсных испытаний позволил установить, что наиболее нагруженные зоны тележек, определенные по результатам расчетной оценки и имитации ходовых испытаний, обеспечивают остаточную долговечность при эксплуатации не менее 4 лет [2].

Таким образом комплекс проведенных расчетно-экспериментальных исследований позволил установить, что тележки двухосные пассажирских вагонов (рамы и надрессорные балки) модели КВЗ-ЦНИИ-I после длительной эксплуатации 42 и более лет обладают достаточным запасом прочности для дальнейшей эксплуатации с соблюдением требований безопасности и надежности.

По результатам проведенных исследований на ГО «Белорусская железная дорога» разработана, апробирована и утверждена установленным порядком методика продления срока службы свыше полуторного тележек пассажирских двухосных (рамы и надрессорные балки), но не более двойного, установленного заводом-изготовителем при условии их эксплуатации на территории Республики Беларусь.

Список литературы

1 АЛВЯ 120.00.00.000. Комплект ремонтной документации на восстановление утраченного ресурса тележек КВЗ-ЦНИИ-I, КВЗ-ЦНИИ-М. – Гомель : БелГУТ, 2019.

2 Проведение испытаний рам и надрессорных балок тележек двухосных пассажирских вагонов после длительной эксплуатации : отчет о НИР / Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель, 2025. – № 94/25-ИЦ.

3 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ : ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.

УДК 629.4.018:629.4.027.2-027.45

ОЦЕНКА ОБОСНОВАННОСТИ НАЗНАЧЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ХОДОВЫХ ЧАСТЕЙ ВАГОНОВ

В. В. ПИГУНОВ, А. В. ПИГУНОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Отметим, что при постановке на производство тележке необходимо пройти ходовые динамические и прочностные испытания, а также испытания на воздействие на путь, которые должны подтвердить соответствие ее показателей всем нормативным требованиям. По результатам испытаний на тележку получают сертификат соответствия ФБУ «РС ФЖТ» [5] и назначают показатели надежности – срок службы или назначенный межремонтный пробег от постройки до первого планового ремонта.

Для подтверждения установленных в технических условиях на вагон, в том числе и на ходовые части, назначенных межремонтных периодов (назначенных сроков службы или назначенных межремонтных пробегов), а также ресурса составных частей и деталей ходовых частей, проводятся эксплуатационные испытания на надежность грузовых вагонов [1]. Такие испытания проводятся в условиях реальной эксплуатации вагонов. При этом расчетом получают выборку вагонов, подлежащих испытанию, и устанавливают продолжительность испытаний или наблюдений.

Минимальное число объектов испытаний устанавливается по формуле

$$N = T_{\Sigma} / (tS),$$

где T_{Σ} – фактическая наработка всех объектов испытаний за время испытаний, км или лет,

$$T_{\Sigma} = T_{\text{рп}}K,$$

$T_{\text{рп}}$ – назначенный межремонтный период, заданный в технических условиях, км или лет; K – коэффициент, который определяется в зависимости от выбранного значения доверительной вероятности для оценки показателя надежности q и предельной относительной ошибки оценки показателя надежности ε по таблице 1 [1]. Для получения объективных результатов принимают ε не более 0,10, q не менее 0,90; t – время проведения эксплуатационных испытания, лет, не менее заданного межремонтного срока; S – средняя наработка вагона за единицу продолжительности испытаний, значение которой устанавливают исходя из принятой для модели вагона эксплуатации, км/год или безразмерная год/год.

Эксплуатацию рекомендуется осуществлять при загрузке вагонов не менее 97 % грузоподъемности и коэффициенте порожнего пробега не более 0,5.

Эксплуатационные испытания на надежность проводят в течение не менее заданной межремонтной наработки (срока или пробега) для каждого объекта испытаний.

При этом наработку определяют в месяцах эксплуатации для вагонов, зарегистрированных по системе ремонта по единичному критерию, в километрах пробега и в месяцах эксплуатации – для вагонов, зарегистрированных по системе ремонта по комбинированному критерию.

В процессе эксплуатационных испытаний выявляются явные и скрытые отказы, а также отказы вследствие изнашивания. При этом явные отказы выявляют осмотрщики вагонов в процессе проведения технического обслуживания, а скрытые отказы и отказы вследствие изнашивания выявляют комиссионно в процессе периодических осмотров.

Периодические осмотры проводят [1]:

– первый – не более чем через 6 месяцев или 50–80 тыс. км пробега;

– последующие – не реже одного раза в 12 месяцев или не реже, чем через каждые 100–120 тыс. км пробега;

– заключительный – после достижения вагонами контрольной группы наработки, соответствующей поступлению в плановый ремонт.

При завершении эксплуатационных испытаний на надежность для каждого объекта испытаний регистрируют наработку, соответствующую поступлению в плановый ремонт.

При выявлении опасного отказа конструктивного или производственного характера результаты эксплуатационных испытаний на надежность считают отрицательными. Повторные эксплуатационные испытаний на надежность проводят после проведения мероприятий по устранению причин опасных отказов (совершенствование вагона). При выявлении опасного отказа эксплуатационного характера испытания на надежность продолжают после проведения мероприятий по устранению причин опасных отказов [1].

В ходе эксплуатационных испытаний на надежность определяют следующие показатели надежности:

а) гамма-процентная наработка от постройки до деповского ремонта;

б) гамма-процентная наработка между плановыми ремонтами;

в) гамма-процентная наработка от постройки до капитального ремонта.

Указанные показатели характеризуют наработку вагона, в течение которой он не достигнет предельного состояния применительно к каждому из видов планового ремонта при вероятности γ, выраженной в процентах, регламентированной в технических условиях.

В процессе испытаний необходимо в первую очередь экспериментально подтвердить заданные показатели вагонов и их составных частей, а также:

– выявить скрытые конструктивные недостатки, которые могут быть использованы для доработки тележки и ее составных частей;

– оценить темпы износов составных частей вагонов в реальных условиях эксплуатации для возможности подтверждения и прогнозирования их ресурса;

– доработать конструкторскую, эксплуатационную и ремонтную документацию на основании промежуточного технического состояния.

Как известно, допускается совмещать проведение эксплуатационных испытаний на надежность с проведением подконтрольной эксплуатации для установочной серии вагонов (для постановки на производство) при аналогичных условиях и сроков ее проведения.

Наиболее широко проводятся подконтрольные эксплуатации вагонов Тихвинского вагоностроительного завода на тележках моделей 18-9855 и 18-9836. При этом в тележке модели 18-9836 использованы конструктивные решения, хорошо зарекомендовавшие себя в тележке модели 18-9855 [5].

Поэтому остановимся на результатах подконтрольной эксплуатации тележек модели 18-9855 на полувагонах модели 12-9853.

Испытывалось 5 вагонов с продолжительностью, равной заданной нормативной периодичности поступления в первый плановый ремонт (8 лет или 1 млн км пробега).

В процессе подконтрольной эксплуатации тележек оценивалось техническое состояние деталей, определяющих надежность тележки модели 18-9855 в эксплуатации [4], в основном это износостойкие детали:

– износостойкое кольцо подпятника;

– износостойкая опорная поверхность колпака скользуна;

– упорные поверхности колпака и корпуса скользуна;

– износостойкие элементы кармана надрессорной балки (износостойкие планки на вертикальных стенках кармана, износостойкая вставка наклонной поверхности кармана);

– фрикционный клин;

– фрикционные планки в рессорном проеме;

– вертикальная стенка адаптера;

– опорная поверхность адаптера под боковую раму.

Одной из основных задач подконтрольных испытаний было обеспечение достоверного определения размера заложенного фактического ресурса и характера его изменения на разных этапах накапливания пробега. Это предполагает проведение периодических осмотров.

В процессе проведения таких осмотров были подтверждены два периода работы износостойких деталей: этап приработки деталей, этап устоявшегося изнашивания.

Первый этап подтверждается к пробегу 315 тыс. км (после 4-го периодического осмотра).

Все последующие 6 периодических осмотров подтвердили работу деталей на этапе устоявшегося изнашивания.

Отметим, что при проведении каждого комиссионного осмотра в процессе накопления пробега анализировались промежуточные результаты, на основании которых выполнялся расчет прогноза запаса ресурса деталей тележек с учетом темпов износа [4].

Запас ресурса сверх фактически достигнутого пробега 1 млн км позволил сделать вывод об обеспечении тележками модели 18-9855 межремонтного пробега не менее 1 млн км на весь межремонтный период.

Последний осмотр перед поступлением вагонов в первый деповской ремонт с накопленным пробегом 1 млн км подтвердил прогнозные величины.

Список литературы

1 ГОСТ 34632-2020. Вагоны грузовые. Метод эксплуатационных испытаний на надежность. – М. : Стандартинформ, 2020. – 47 с.

2 О надежности полувагонов модели 12-9853 на тележках модели 18-9855 при пробеге 800 тыс. км / А. А. Рудь, А. Л. Борисов, А. Н. Вязников [и др.] // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2019. – № 4 (60). – С. 31–33.

3 **Бабанин, В. С.** Уточненный прогноз ресурса износостойких деталей тележки модели 18-9855 / В. С. Бабанин, А. А. Рудь, А. Л. Борисов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2020. – № 2 (62). – С. 34–35.

4 О результатах подконтрольной эксплуатации полувагонов 12-9853 / В. С. Бабанин, А. Л. Борисов, А. Н. Вязников, А. А. Рудь // Вагоны и вагонное хозяйство. – № 1 (69). – 2022. – С. 28–32.

5 О результатах подконтрольной эксплуатации тележек модели 18-9836 / В. С. Бабанин, А. Л. Борисов, А. Н. Вязников [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2023. – № 6. – С. 30–33.

УДК 629.463.65:620.178

ВИРТУАЛЬНЫЕ И НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КРЫШЕК ЛЮКОВ ПОЛУВАГОНОВ

А. В. ПИГУНОВ, В. В. ПИГУНОВ, С. А. СКОРОХОДОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Обеспечение безопасной эксплуатации грузовых вагонов тесно связано с обеспечением механической и усталостной прочности элементов металлоконструкции кузова.

Как известно, правила эксплуатации полувагонов соблюдаются не всегда (роспуск с горок с повышенными скоростями, интенсивное проведение погрузочно-разгрузочных работ), что приводит к различного рода повреждениям. Так, при больших скоростях роспуска с горок повреждаются автосцепные устройства, торцевые стены полувагонов и т. п., при интенсивной погрузке-выгрузке при использовании специальной техники и механизмов (экскаваторы, грейферы, вагоноопрокидыватели, вибрационные машины) повреждаются верхние обвязки боковых стен, обшивка, стойки и их заделки, крышки люков, разрушаются сварные швы и т. п. Анализ статистических данных, которые заводы-изготовители собирают в целях оценки качества выпускаемой продукции, совершенствования технологий производства и применения новых конструкторских решений, показывает, что наиболее сильное влияние на повреждаемость металлоконструкции полувагона оказывает проведение погрузочно-разгрузочных работ. Одним из наиболее подверженных всякого рода повреждениям элементом является крышка люка. Она непосредственно воспринимает нагрузку от перевозимого груза, как при погрузочно-разгрузочных работах, так и при движении вагона по железнодорожному пути.

В целях обеспечения прочности и безопасной эксплуатации полувагона для крышки люка нормативными документами [2, 3] установлены требования, соблюдение которых должно обеспечивать безотказную работу в пределах обозначенного промежутка времени.

Так, согласно ГОСТ 33211-2014 крышки люков полувагона проверяется на прочность при следующих условиях:

а) при падении крышки люка на упоры при разгрузке полувагона, загруженного до максимальной расчетной статической осевой нагрузки;

б) при падении на закрытую крышку люка при погрузке вагона кускового груза общей массой 2000 кг (при массе отдельных кусков не более 100 кг) с высоты 3 м;

в) при падении в центр закрытой крышки груза массой 150 кг с высоты 3 м.

Кроме того, согласно ГОСТ 22235-2023 должны также соблюдаться следующие условия:

– равномерно распределенная нагрузка на крышку люка полувагона не должна превышать 59 кН.

– давление на крышку люка, сосредоточенное на площадке размерами 0,25×0,25 м и менее, не должно превышать 0,8 МПа.

Однако существующая нормативная база не в полной мере отражает реальное распределение сил, возникающих в металлоконструкции крышки люка при эксплуатации: масса груза и высота его сброса не всегда соответствуют нормативам, груз не всегда падает в центр крышки, а сосредоточенная на площадке нагрузка может располагаться в любом ее месте.

Выявляемое в ходе прочностных испытаний несоответствие расчетных и экспериментальных характеристик обуславливает потенциальные риски, влияющие на долговечность и безопасность эксплуатации конструкции вагона в целом.

Сравнительный анализ виртуальных и натурных исследований прочности крышки люка при действии равномерно распределенной нагрузки, а также при падении крупнокускового груза с высоты 3 м осуществлялся сопоставлением полученных величин напряжений при моделировании и при испытаниях.

Программа исследования содержала следующие этапы:

– на первом этапе проводились натурные эксперименты в соответствии с требованиями [2]:

а) исследуемый образец крышки люка устанавливался на полувагон;

б) на крышку люка, согласно разработанной схеме, устанавливались тензорезисторы марки BE120-10AA-X-3,5 с последующим монтажом и настройкой измерительной аппаратуры;

в) непосредственно выполнялись натурные эксперименты;

– на втором этапе на основании полученных результатов определялись зоны действия и величины силовых факторов для использования их при моделировании;

– на третьем этапе, согласно конструкторской документации на крышку люка, была построена геометрическая модель, сформирована конечно-элементная сетка и выполнены виртуальные эксперименты посредством метода конечных элементов (МКЭ) с использованием некоторых вводных данных, зафиксированных в эксперименте. МКЭ реализован в программном комплексе SolidWorks 2019;

– на четвертом этапе проанализированы полученные результаты при проведении натурных и виртуальных испытаний с целью оценки их сходимости и сделаны следующие выводы:

1) напряжения в контрольных точках не превысили допускаемых значений напряжений;

2) значения напряжений в контрольных точках, по результатам расчета при равномерном нагружении оказались выше экспериментальных данных;

3) значения напряжений в контрольных точках в среднем при проведении виртуальных испытаний на воздействие ударной нагрузки от падения груза оказались всего на 1 % ниже экспериментальных данных;

4) при проведении натурных испытаний на воздействие ударной нагрузки от падения груза гофрированный лист крышки люка получил остаточные деформации: напряжения в зоне удара намного превышали предел текучести используемой стали.

– на пятом этапе рассмотрен случай, когда для оценки ударной прочности крышки люка используется коэффициент динамической деформации, выполнен сравнительный анализ с данными, полученными в результате виртуального эксперимента, и сделаны соответствующие выводы:

1) определение величины силы в зоне контакта возможно при наличии исходных экспериментальных данных, в частности, времени ее нарастания до максимального значения;

2) применение энергетического метода с использованием коэффициента динамической деформации при определении ударной нагрузки имеет ограниченное использование: метод предполагает только упругий удар, а значит, полностью исключены остаточные деформации. Это возможно как при малой высоте падения груза, так и при достаточно малой массе кускового груза, либо когда при его падении происходит одновременный многоточечный контакт с поверхностью крышки люка. Также метод пригоден для поддерживающих конструкций, которые воспринимают нагрузку опосредованно и достаточно удалены от зоны взаимодействия контактирующих в процессе удара элементов [9];

3) время нарастания силы до максимального значения по результатам эксперимента достаточно велико (0,015 с), что несопоставимо с теоретическим временем [6]. Это можно объяснить тем, что удар не является абсолютно упругим, так как крышка люка шарнирно крепится к раме, а кузов опирается на тележки с рессорным подвешиванием.

Список литературы

1 Технология производства и ремонта вагонов : учеб. для студентов вузов ж.-д. трансп. / К. В. Мотовилов, В. С. Лукашук, В. Ф. Криворудченко, А. А. Петров, К. В. Мотовилова. – М. : Маршрут, 2003. – 382 с.

2 ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (с Поправкой, с Изменением № 1). – Введ. 01.07.2016. – М. : Стандартинформ, 2016. – 58 с.

3 Сопротивление материалов деформированию и разрушению : справ. пособие / под ред. акад. АН Украины В. Т. Трощенко. В 2 ч. Ч. 2. – Киев : Наук. думка, 1994. – 702 с.

4 ГОСТ 22235-2023. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. – Введ. 01.06.2025. – М. : Рос. ин-т стандартизации, 2024. – 24 с.

5 **Кочетков А. В.** Некоторые вопросы теории удара / А. В. Кочетков, П. В. Федотов // Науковедение : интернет-журнал. – 2013. – Т. 5, № 5. – URL: https://naukovedenie.ru/PDF/110tvn513.pdf (дата обращения: 10.09.2026).

6 Физическая энциклопедия. В 5 т. Т. 5 / под гл. ред. А. М. Прохорова. – М. : Большая российская энциклопедия. 1998. – 691 с.

7 Решение динамических задач с учетом сил инерции и ударной нагрузки : пособие для студентов / сост. : Ю. В. Василевич, Е. Ю. Неумержицкая, В. М. Хвасько [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – 75 с.

8 **Булычев, М. А.** Исследование напряженно-деформированного состояния крышки люка полувагона по требованиям проектирования / М. А. Булычев // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сб. науч. трудов 14-й Междунар. науч.-практ. конф, Курск, 13–14 марта 2019 г. / Юго-Западный гос. ун-т. ; редкол. А. А. Горохов (гл. ред.) [и др.]. – Курск, 2019. – С. 39–42.

9 **Болгов, Е. В.** Установка для испытания моделей крышек люков полувагонов на ударные нагрузки / Е. В. Болгов // Известия петербургского университета путей сообщения. – 2011. – № 3 (28). – С. 39–47.

10 Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский [и др.] ; под ред. А. С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – М. : Машиностроение, 2003. – 784 с.

УДК 629.4

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ГРУЗОВЫЕ ВАГОНЫ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. В. ПУТЯТО, М. Г. ГЕГЕДЕШ

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

Подвижной состав железнодорожного транспорта в процессе эксплуатации находится под воздействием комплекса статических и динамических нагрузок, имеющих различную природу, характеризующихся величиной, частотой приложения, направлением и длительностью действия. Источниками динамических нагрузок являются множество факторов: неровности пути и рельсовых нитей, стыки, стрелочные переводы, дефекты рельсов, неравномерность профиля колеса, кривые малого радиуса, разгоны, торможения, маневровые соударения, ветровые воздействия и внешние возмущения, неуравновешенность вращающихся масс, колебания, вызванные упругостью и демпфированием элементов конструкции и др.

Вертикальные динамические нагрузки обусловлены передачей веса подвижного состава через колесо на рельс с добавлением инерционных составляющих и усиливают контактные напряжения в зоне «колесо – рельс», а также повышают требования к прочности рессорного подвешивания. Боковые нагрузки возникают при движении в кривых, на участках с отклонением пути, при колебаниях экипажа и воздействии бокового ветра, что приводит к увеличению бокового давления на рельсы, износу гребней колес, рискам потери устойчивости движения, росту напряжений в конструктивных элементах ходовой части, рамы и кузова. Продольные динамические нагрузки часто действуют импульсно и вызывают значительные напряжения не только в автосцепных устройствах, но и в несущих конструкциях вагона в целом. Крутильные динамические нагрузки характерны для несимметричного нагружения кузова и тележек, а также при попадании одной стороны экипажа на участок с отличающейся жесткостью или уровнем пути, что представляет особенную опасность для длиннобазных вагонов из-за перераспределения реакций в колесных парах и возможной разгрузки отдельных колес.

Периодический, квазипериодический, случайный или импульсный характер нагрузок способствует постепенному накоплению повреждений в материале, вызывая появление трещин в рамах тележек, буксовых узлах, сварных соединениях и элементах автосцепки. Боковые силы и моменты, способные вызвать набегание гребня, виляние тележек и ухудшение направляющей способности, относятся к нагрузкам, обуславливающим потерю устойчивости движения вагона, особенно на высоких скоростях и в кривых, а избыточная вибрация ускоряет износ оборудования, снижает эксплуатационные качества подвижного состава, приводит к ослаблению фиксации перевозимых грузов.

Таким образом, взаимодействие единиц подвижного состава между собой (в составе поезда) и элементами инфраструктуры (железнодорожным путем, средствами механизации при погрузке-выгрузке и т. п.), а также взаимодействие конструктивных элементов вагонов между собой и с перевозимыми грузами вызывают сложные нестационарные процессы в системе «вагон – груз – инфраструктура», напрямую определяющие динамические и прочностные показатели безопасности железнодорожного подвижного состава.

В частности, проведенные исследования показали важность учета в ряде случаев при оценке динамических и прочностных характеристик вагона возможности относительной подвижности груза в процессе транспортировки [1, 2]. К грузам с малой относительной подвижностью относятся грузы, жестко закрепленные в кузове или на платформе вагона. Для этой категории характерны сравнительно стабильное распределение нагрузок, локальные напряжения в местах крепления, зависимость уровня воздействия от массы груза и параметров движения вагона. Грузы со средней относительной подвижностью в процессе перевозки способны незначительно смещаться или деформироваться, не теряя при этом общей устойчивости. Это, например, некоторые виды тарно-штучных грузов, крупные упаковки и изделия, размещенные с зазорами или на эластичных прокладках. К особенностям динамического взаимодействия вагонов с такими грузами относят появление переменных контактных нагрузок, неравномерное распределение давления на пол и элементы крепления, возможность возникновения дополнительных колебательных режимов. Перевозка жидких, сыпучих и иных грузов с высокой относительной подвижностью является наиболее сложной с точки зрения динамики, поскольку относительное движение массы груза внутри емкости или кузова сопровождается значительным изменением положения центра тяжести и возникновением волновых, ударных и перераспределительных эффектов. Для таких грузов характерны перемещение свободной поверхности, удары о стенки и перегородки, а также существенное влияние на устойчивость вагона.

В то же время многие детали вагонов взаимодействуют между собой, а также с внешними телами (другими вагонами, рельсовой колеей) посредством различных связей, допускающих относительную подвижность. Взаимное смещение, сопровождающееся зачастую контактным взаимодействием, приводит к износу сопрягаемых поверхностей, который приводит к изменению качества поверхности, изменению геометрических размеров и формы. Важно отметить, что износ элементов конструкций подвижного состава (поверхностей катания колес, скользунов, подвижки в болтовых соединениях и т. п.), а также элементов инфраструктуры (головки рельса, отклонение геометрии рельсовой колеи в плоскостях, стрелочных переводов и т. п.) в процессе эксплуатации вызывают дополнительные динамические составляющие, которые в совокупности рассматриваемых факторов могут привести к нарушению критериев безопасности (коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельса, воздействия на железнодорожный путь и т. д.), а также увеличению уровня напряжений и интенсивности расхода ресурса.

Таким образом, нагрузки на вагон наряду с характером действия (статические, динамические, в т. ч. ударные) можно представить двумя основными блоками: действующими, в основном, на кузов от грузов различной природы и действующими на всю конструкцию вагона. А также третьим дополнительным блоком, в котором предлагается учитывать возникновение дополнительных динамических воздействий в результате изменения технического состояния элементов подвижного состава и инфраструктуры в процессе эксплуатации, при расчетах показателей безопасности динамики вагона и динамических напряжений. Следует отметить, что в третьем блоке эндогенные параметры (износы, перемещения в соединениях и т. п.) и экзогенные (показатели безопасности, дополнительные составляющие динамических напряжений) являются переменными, взаимовлияющими.

Отметим, что при проектировании нового подвижного состава, проведения расчетной и экспериментальной оценки динамических и прочностных показателей, определяющих соответствие продукции требованиям безопасности, не учитывается, что в последствии вагон эксплуатируется с из-

носами ходовых частей, железнодорожной инфраструктуры и иными отклонениями (в рамках действующей нормативной документации) геометрических размеров конструктивных элементов системы «вагон – груз – инфраструктура».

Предлагаемая систематизация динамических нагрузок, учитывающая дополнительные динамические воздействия в результате изменения технического состояния элементов подвижного состава и инфраструктуры в процессе эксплуатации, позволит на стадии проектирования на основе компьютерного и математического моделирования выделить наиболее опасные сочетания силовых воздействий по критериям обеспечения требуемых динамических и прочностных показателей безопасности и выработать предложения по повышению динамических качеств вагона и увеличению его ресурса.

Список литературы

1 **Шимановский, А. О.** Моделирование колебаний и напряженно-деформированного состояния пакетов сэндвич-панелей при их транспортировке / А. О. Шимановский, И. Е. Кракова // Строительная механика и конструкции. – 2022. – № 4 (35). – С. 49–57.

2 Совершенствование конструкций железнодорожного подвижного состава на основе учета деформирования транспортируемого груза / А. В. Путято, А. О. Шимановский, М. Г. Гегедеш, П. М. Афанаськов // Вестник российской академии естественных наук. – 2024. – № 1. – С. 75–83.

УДК 629.46.083

К ВОПРОСУ О РАЦИОНАЛЬНЫХ СРОКАХ СЛУЖБЫ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

В. Ф. РАЗОН, В. В. БУРЧЕНКОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Определение рационального срока службы вагона необходимо с целью наиболее экономичного использования вагона с минимальными расходами на техническое содержание, текущий и плановые виды ремонта за весь жизненный цикл от начала эксплуатации до момента списания. Вместе с тем в течение всего этого срока при принятой системе технического обслуживания и ремонта вагон должен полностью удовлетворять всем условиям сохранной и безопасной перевозки грузов.

Существуют различные варианты подхода к решению этой задачи, которые можно разделить на две группы: директивное установление срока службы и экономически обоснованное.

Директивный метод основывается на волевом решении уполномоченного для этого органа в структуре управления соответствующего министерства или ведомства. Срок службы устанавливается заранее исходя из опыта безаварийной эксплуатации вагонов аналогичного типа в условиях принятой системы технического обслуживания и ремонта. При этом учитываются конструктивные изменения новых вагонов по сравнению с существующими и факторы улучшения качества работ при изготовлении и ремонте за счет внедрения более современных материалов и технологий. Достоинство этого метода в относительной простоте реализации, а недостаток в том, что все указанные факторы можно оценить приближенно с определенной степенью достоверности.

Экономически обоснованный срок службы определяется на основе сравнительных расчетов цены вагона и расходов на его ремонт. Типичным является вариант, при котором сравниваются цена нового вагона Ц и суммарная стоимость ремонтов существующего эксплуатируемого вагона ΣC_i. Как только стоимость ремонтов достигает значения цены нового вагона, то дальнейшая эксплуатация существующего вагона считается нерациональной. При этом предполагается, что новый вагон обладает некоторыми достоинствами и дополнительными качествами, которые благоприятно влияют на его работоспособность и эффективность экономического использования.

Срок эксплуатации определяется зависимостью

$$T = Ц / \Sigma C_i \cdot К, \quad (1)$$

где К – коэффициент улучшении качества работ при ремонте нового вагона (К > 1).

Недостаток прямого расчета по формуле (1) состоит в том, то эти расходы на покупку нового и ремонт эксплуатируемого вагона осуществляются в разное время и их сопоставление представляет определенную сложность. Поэтому необходимо использовать коэффициенты корреляции (дискон-

тирования), учитывающие разновременность затрат различных видов. Расчет коэффициентов дисконтирования выполняется по известным методикам.

Предлагается методика расчета, в которой срок эксплуатации вагона основывается на одновременном учете четырех факторов:

– цены нового вагона $Ц_н$;

– нормативного срока эксплуатации нового вагона $T_н$;

– стоимости очередного ремонта существующего вагона $С_р$;

– срока эксплуатации отремонтированного вагона, обеспечивающего его безаварийную работу, $T_р$.

При этом сравниваются ресурсы нового вагона и восстановленный ресурс отремонтированного вагона.

Эксплуатация вагона прекращается, когда стоимость единицы ресурса отремонтированного вагона превышает стоимость единицы ресурса нового вагона:

$$С_р / T_р > Ц_н / T_н. \quad (2)$$

Достоинство этого метода состоит в том, что в нем используются актуальные на данный момент стоимостные показатели цены и очередного ремонта вагона.

УДК 629.46.083

К ВОПРОСУ О НОРМАТИВНЫХ СРОКАХ ПЛАНОВЫХ ВИДОВ РЕМОНТА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

В. Ф. РАЗОН, В. В. БУРЧЕНКОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

На Белорусской железной дороге Приказом № 15Н от 16.01.2017 г. утверждены Правила технической эксплуатации дороги, устанавливающие планово-предупредительную дифференцированную систему ремонта вагонов, в которой указаны нормативный срок службы, а также интервалы выполнения деповских и капитальных видов ремонта.

Назначение капитального ремонта состоит в восстановлении исправности вагона, полного или близкого к полному восстановлению ресурса вагона. Исходя только из этого определения можно предположить, что срок службы вагона может быть неограниченным! Однако с течением времени из-за различных видов изнашивания: коррозионного, усталостного и других – теряется несущая способность основных элементов вагона, воспринимающих нагрузки при его эксплуатации.

Деповской ремонт выполняется для восстановления исправности и частичного восстановления ресурса вагона в период между капитальными ремонтами. Поскольку в ходе деповского ремонта выполняются регламентные работы, одинаковые для всех деповских ремонтов в течение срока эксплуатации вагона, то можно предположить, что периоды между деповскими ремонтами должны быть одинаковыми или близкими к этому.

Исходя из вышеизложенных предположений рассмотрим периоды времени между деповскими (ДР) и капитальными (КР) ремонтами грузовых вагонов, принятые на Белорусской железной дороге, представленные в таблицах 1–15, от начала и до окончания эксплуатации.

Таблица 1 – **Универсальный крытый вагон**

Год от начала эксплуатации	0	3	6	9	12	13	16	19	22	25	28	31	32
Номер межремонтного интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	3	3	3	3	**1**	3	3	3	3	3	3	**1**
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	ДР3	ДР4	КР1	ДР5	ДР6	ДР7	КР2	ДР8	ДР9	Окончание

Вызывает вопрос значительное сокращение межремонтного интервала времени с трех лет до одного года после ДР4 перед КР1 и аналогичное сокращение после ДР9 перед окончанием нормативного срока службы вагона.

Таблица 2 – **Крытый вагон для перевозки зерна**

Год от начала эксплуатации	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
Номер интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	ДР3	ДР4	КР1	ДР5	ДР6	КР7	ДР8	Окончание

Наблюдается полное согласование между всеми межремонтными интервалами времени.

Таблица 3 – **Крытый вагон для перевозки автомобилей**

Год от начала эксплуатации	0	3	6	8	11	14	16	19	22	24	27	30
Номер интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	13
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	3	3	**2**	3	3	**2**	3	3	**2**	3	3
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	КР1	ДР3	ДР4	КР2	ДР5	ДР6	КР3	ДР7	Окончание

Сокращение межремонтного интервала с трех до двух лет после ДР перед КР за счет возможного снижения надежности вагона требует подтверждения дополнительными исследованиями.

Таблица 4 – **Крытый вагон для перевозки скота**

Год от начала эксплуатации	0	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	30
Номер интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	**1**
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	ДР3	ДР4	ДР5	ДР6	КР1	ДР7	ДР8	ДР9	ДР10	ДР11	ДР12	ДР13	Окончание

Значительное сокращение интервала времени с двух лет до одного года после последнего ДР13 и окончанием срока службы за счет возможного снижения надежности вагона, требует дополнительного анализа.

Таблица 5 – **Универсальная платформа**

Год от начала эксплуатации	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	32
Номер интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	**2**
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	ДР3	ДР4	КР1	ДР5	ДР6	ДР7	КР2	ДР8	Окончание

Сокращение интервала времени с трех до двух лет после последнего ремонта ДР8 и окончанием срока эксплуатации за счет возможного снижения надежности вагона требует подтверждения дополнительными исследованиями.

Таблица 6 – **Платформа для перевозок большегрузных контейнеров, крупнотоннажных контейнеров и колесной техники. Для перевозки рулонной стали, листовой стали, заготовок, колес, колесных пар. Для перевозки лесоматериалов**

Год от начала эксплуатации	0	3	6	9	12	15	17	20	23	26	29	32
Номер интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	3	3	3	3	3	**2**	3	3	3	3	3
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	ДР3	ДР4	ДР5	КР1	ДР6	ДР7	КР2	ДР8	Окончание

Сокращение интервала времени с трех до двух лет между ремонтами ДР5 и КР1 за счет возможного снижения надежности вагона требует подтверждения дополнительными исследованиями.

Таблица 7 – **Полувагон универсальный**

Год от начала эксплуатации	0	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Номер интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	КР1	ДР3	ДР4	ДР5	КР2	ДР6	ДР7	Окончание

Наблюдается полное согласование между всеми межремонтными интервалами времени.

Таблица 8 – **Полувагон глуходонный**

Год от начала эксплуатации	0	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	22
Номер интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	**1**
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	ДР3	ДР4	КР1	ДР5	ДР6	ДР7	ДР8	ДР9	Окончание

После последнего ДР9 вагон эксплуатируется только 1 год, что требует подтверждения дополнительными исследованиями надежности вагона.

Таблица 9 – **Думпкар**

Год от начала эксплуатации	0	3	5	7	9	10	12	14	16	17	19	21	22
Номер интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	3	2	2	2	**1**	2	2	2	**1**	2	2	**1**
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	ДР3	ДР4	КР1	ДР5	ДР6	ДР7	КР2	ДР8	ДР9	Окончание

Значительное сокращение интервала времени с двух лет до одного года между ДР4 и КР1, между ДР7 и КР2, между ДР9 и окончанием срока службы вагона за счет возможного снижения надежности вагона требует дополнительного анализа.

Таблица 10 – **Хоппер-дозаторы**

Год от начала эксплуатации	0	3	6	9	10	13	16	18	21	24	25
Номер интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	3	3	3	**1**	3	3	**2**	3	3	**1**
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	ДР3	КР1	ДР4	ДР5	КР2	ДР6	ДР7	Окончание

Вызывает вопрос значительное сокращение межремонтного интервала времени с трех лет до одного года между ДР3 и КР1, между ДР 7 и окончанием срока службы вагона, с трех до двух лет между ДР5 и КР2. Все это требует дополнительного анализа надежности вагона в этих интервалах времени.

Таблица 11 – **Цистерны 4-осные нефтебензиновые**

Год от начала эксплуатации	0	3	6	9	12	13	16	19	22	25	28	31	32
Номер интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	3	3	3	3	**1**	3	3	3	3	3	3	**1**
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	ДР3	ДР4	КР1	ДР5	ДР6	ДР7	КР2	ДР8	ДР9	Окончание

Значительное сокращение интервала времени с трех лет до одного года между ДР4 и КР1, между ДР9 и окончанием срока службы вагона, в то время как интервал после ДР7 перед КР2 остается три года, что требует обоснования возможной потери надежности вагона.

Таблица 12 – **Цистерны 8-осные нефтебензиновые**

Год от начала эксплуатации	0	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	22	24	26	28	30	32
Номер интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	**1**	2	2	2	2	2
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	ДР3	ДР4	КР1	ДР5	ДР6	ДР7	ДР8	ДР9	КР2	ДР10	ДР11	ДР12	ДР13	Окончание

Вызывает вопрос значительное сокращение межремонтного интервала времени с трех лет до одного года между ДР7 и КР2, в то время как в остальных интервалах времени ДР обеспечивает необходимый уровень восстановления ресурса вагона.

Таблица 13 – **Цистерны для перевозки кислоты 4- и 8-осные**

Год от начала эксплуатации	0	2	4	5	7	9	10	12	14	15	17	18
Номер интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	2	2	**1**	2	2	**1**	2	2	**1**	2	**1**
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	КР1	ДР3	ДР4	КР2	ДР5	ДР6	КР3	ДР7	Окончание

Наблюдается сокращенный интервал времени после ДР перед КР из-за сложных условий эксплуатации, что требует проведения анализа возможной потери надежности вагона в этих интервалах.

Таблица 14 – **Цистерны для перевозки цемента и других порошкообразных грузов**

Год от начала эксплуатации	0	3	5	7	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
Номер интервала		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	3	2	2	2	**1**	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	ДР3	ДР4	КР1	ДР5	ДР6	ДР7	ДР8	КР2	ДР9	ДР10	ДР11	Окончание

Имеется сокращенный интервал времени между ДР4 и КР1 с двух лет до одного года, в то время как между ДР8 и КР2, а также между ДР11 и окончанием срока службы вагона сокращается межремонтный интервал 2 года.

Таблица 15 – **Цистерны для перевозки пропана, аммиака, углеводородных газов**

Год от начала эксплуатации	0	3	5	7	9	10	12	14	16	18	20
Номер интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длительность интервала между ремонтами, лет	–	3	2	2	2	**1**	2	2	2	2	2
Вид ремонта	Начало	ДР1	ДР2	ДР3	ДР4	КР1	ДР5	ДР6	ДР7	ДР8	КР2

Окончание таблицы 15

Год от начала эксплуатации	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
Номер интервала	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длительность интервала между ремонтами, лет	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Вид ремонта	ДР9	ДР10	ДР11	ДР12	КР3	ДР13	ДР14	ДР15	ДР16	Окончание

Имеет место сокращенный интервал времени между ДР4 и КР1 с двух лет до одного года.

Анализ представленной информации показывает, что не используется полностью заложенный **в ходе деповского ремонта** восстановленный ресурс вагона при сокращении интервала времени до следующего планового ремонта или окончания эксплуатации:

– универсальный крытый вагон, хоппер-дозаторы, цистерны 4- и 8-осные нефтебензиновые – с трех лет до одного года;

– крытый вагон для перевозки автомобилей, платформы различного назначения – с трех до двух лет;

– крытый вагон для перевозки скота, глуходонный полувагон, думпкар, цистерны для перевозки кислоты 4- и 8-осные, цистерны для перевозки цемента и порошкообразных грузов, цистерны для перевозки пропана, аммиака, углеводородных газов – с двух лет до одного года.

Имеет место также неполное использование заложенного восстановленного ресурса вагонов **в ходе капитального ремонта** за счет сокращения срока службы:

– универсальный крытый вагон, цистерны 4-осные нефтебензиновые – с двенадцати до семи лет;

– крытый вагон для перевозки автомобилей – с восьми до шести лет;

– универсальная платформа – с двенадцати до пяти лет;

– думпкар – с семи до пяти лет;

– хоппер-дозаторы – с восьми до семи лет;

– цистерны 8-осные нефтебензиновые – с одиннадцати до десяти лет;

– цистерны для перевозки кислоты 4- и 8-осные – с пяти до трех лет;

– цистерны для перевозки цемента и других порошкообразных грузов – с десяти до восьми лет.

Целесообразность подобных сокращений требует проведения дополнительных исследований возможной потери надежности вагонов в межремонтные периоды. Это можно оценить по интенсивности отцепок (количеству отцепок за единицу времени) вагонов в текущий ремонт в сокращенных межремонтных периодах по сравнению с обычными. Если надежность вагонов в укороченных межремонтных периодах не наблюдается, то можно предпринять необходимые организационные мероприятия для изменения сроков службы и межремонтных периодов грузовых вагонов.

УДК 629.331-83(091)

ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

А. А. САТТАРОВ
Андижанский государственный технический институт, Республика Узбекистан

В XVIII веке были созданы первые паровые двигатели, которые начали курсировать по улицам. Однако уменьшенная модель первого двигателя с электрической тягой была изобретена в 1828 году венгерским инженером Аньошем Йедликом (рисунок 1). Это изобретение стало одним из главных толчков к созданию электрокаров.

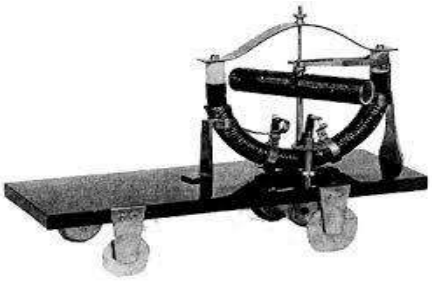


Рисунок 1– Модель двигателя с электротягой А. Йедлика

В 1834 году американец Томас Дэвенпорт создал свое электрическое устройство. В том же году ученый установил свою разработку на макет электрифицированного поезда, движущегося по круговой трассе. Чиновники долго колебались с выдачей патента на это изобретение, из-за чего процесс его получения затянулся на три года.

В 1835 году голландский профессор Сибрандус Стратинг и его ассистент Кристофер Беккер создали небольшой трехколесный электрический механизм, работавший от незаряжаемых первичных гальванических элементов (рисунок 2). Вес этого первого в мире электромобиля не превышал трех килограммов. При полной зарядке батареи он мог двигаться в течение двадцати минут и был способен перевозить груз массой до 1,5 килограмма.



Рисунок 2 – Электрический механизм С. Стратинга и К. Беккера

В этот же период шотландский изобретатель Роберт Андерсон провел эксперимент по установке электродвигателя на конную повозку. А его соотечественник Роберт Дэвидсон сконструировал электровоз, способный перевозить 6 тонн груза на расстояние 2,4 км со скоростью 6 км/ч, что практически соответствовало скорости шага человека.

С середины XIX века страны Америки и Европы сделали уверенные шаги на пути создания электромобилей. Изобретение свинцового аккумулятора Гастоном Планте в 1858 году значительно ускорило этот процесс (рисунок 3). Позже, в 1881 году, французский инженер-химик Камиль Альфонс Фор усовершенствовал конструкцию свинцово-кислотного аккумулятора Гастона Планте, благодаря чему его емкость существенно возросла (рисунок 4).

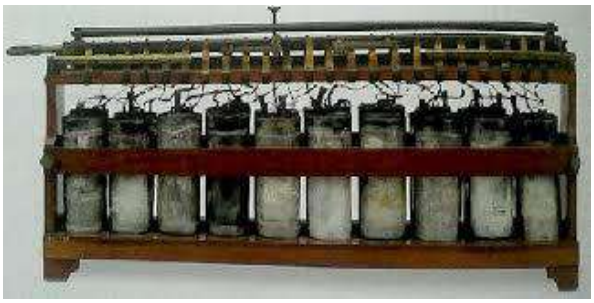


Рисунок 3 – Свинцовый аккумулятор Г. Планте

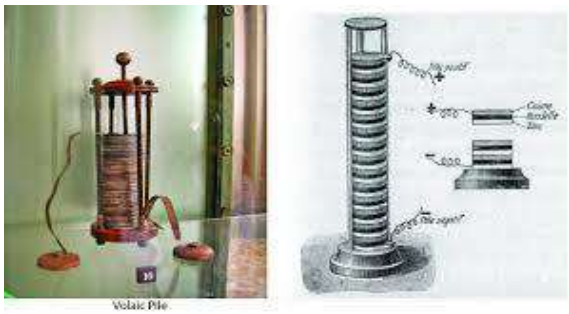


Рисунок 4 – Свинцово-кислотный аккумулятор Камиля Альфонса Фора

На Международной электрической выставке в Париже в 1881 году французский изобретатель Гюстав Труве представил трехколесный велосипед с электрическим двигателем. В том же году его соотечественник Шарль Жанто оснастил повозку электрическим двигателем с аккумулятором, а в

период с 1884 по 1906 год наладил коммерческое производство электрических самоходных экипажей под брендом Jeantaud.

В 1884 году Томас Паркер разработал первые английские электромобили. Примерно в те же годы в Лондоне начали курсировать аккумуляторные электротакси Уолтера Берси, которые имели запас хода 48 км на одной зарядке и развивали скорость до 14,5 км/ч. В 1888 году Андреас Флокен создал в Германии первый электромобиль на базе самоходной повозки с электродвигателем.

Первый американский электромобиль был построен в 1891 году с использованием электрической батареи, разработанной Уильямом Моррисоном. Шестиместный экипаж мог развивать скорость до 23 км/ч и стал первым автомобилем, оснащенным рулевым колесом.

В 1894 году на улицах Нью-Йорка появились первые электрические такси, разработанные инженером-механиком Генри Моррисом и химиком Педро Саломом в Филадельфии. Эти автомобили преодолевали расстояние в 40 км на одной зарядке, а их максимальная скорость составляла 32 км/ч. Вскоре после этого в Америке стало расти число других электромобилей с различными характеристиками: одни проезжали от 80 до 128 км со скоростью 22,5 км/ч, другие – до 130 км со скоростью 32 км/ч.

В 1898 году французский гонщик Гастон де Шаслу-Лоба развил на электромобиле скорость 68 км/ч, а в следующем году этот рекорд был доведен почти до 106 км/ч. Четыре года спустя электромобиль Torpedo Уолтера Бейкера развил скорость 161 км/ч.

В 1897 году нью-йоркские таксисты стали первыми коммерческими покупателями электрических экипажей. К 1900 году четверть всех автомобилей в США составлял электротранспорт, и в те годы электромобили продавались в больших объемах, чем традиционные машины с двигателем внутреннего сгорания (ДВС).

Из-за нефтяного кризиса 1970-х годов спрос на электромобили снова начал расти. В силу вступили новые законы по внедрению электромобилей в практику, началась разработка специализированных программ. Однако скорость новых электрокаров достигала всего 45 км/ч, а запас хода на одной зарядке ограничивался 90 км. Эти результаты уступали даже показателям исследований пятидесятилетней давности.



Рисунок 5 – Электромобиль Sebring-Vanguard Citicar

Электромобиль Sebring-Vanguard Citicar (рисунок 5), массовое производство которого началось в США в 1974–1977 годах, обладал аналогичными характеристиками. Из-за специфического дизайна автомобиль не смог заинтересовать покупателей. К концу 1970-х годов интерес и спрос на электромобили угасли, и в течение последующих 15 лет на рынке доминировали автомобили, работающие на жидком топливе. Однако в середине 1990-х гг. новые федеральные правила помогли автопроизводителям модифицировать популярные модели в электромобили, приблизив их по скоростным показателям к бензиновым аналогам.

В 1996 году компания GM выпустила электромобиль EV1, разработанный с нуля (рисунок 6). В 1997 году Toyota представила серийный гибрид Prius (рисунок 7). К 2000 году они распространились по всему миру, завоевали популярность среди знаменитостей и вновь подняли престиж экологически чистого транспорта.



Рисунок 6 – Электромобиль General Motors EV1



Рисунок 7 – Электромобиль Toyota Prius

Крупнейший прорыв в отрасли произошел в 2006 году, когда калифорнийский стартап Tesla объявил о начале производства роскошного электрического спорткара с запасом хода 300 км. Министерство энергетики США также не осталось в стороне, создав инфраструктуру коммерческих и общественных зарядных станций по всей стране. В 2010 году компания Chevrolet выпустила свой

первый серийный плагин-гибрид Volt (рисунок 8), а Nissan представил полноценный экологически чистый электромобиль Leaf.



Рисунок 8 – Электромобиль компании Chevrolet

Самой дорогой частью электромобиля является его аккумуляторная батарея, высокая стоимость которой долгое время беспокоила многих автовладельцев. К 2013 году Министерство энергетики США инвестировало значительные средства в развитие электротехнических технологий, добившись снижения цен почти на 50 % за 4 года.

Тот факт, что люди по всему миру отказываются от личных автомобилей в пользу пеших прогулок, велосипедов или общественного транспорта, оказывает заметное влияние на снижение мировых продаж автомобилей. Тем не менее Международное энергетическое агентство (МЭА) сообщает, что даже в таких условиях продажи электромобилей продолжают расти. Лидером по продажам электромобилей является Китай. Поскольку крупнейшими источниками загрязнения атмосферы выступают Китай, ЕС и США, рост доли электромобилей оценивается как позитивная тенденция.

Подобная историческая трансформация мировой автомобильной промышленности неизбежно затронет и глобальную нефтяную индустрию.

«*Двигатель внутреннего сгорания оставался непревзойденным более века, но статус электромобилей меняется. К 2030 году они приведут к сокращению потребности в нефти как минимум на 5 миллионов баррелей в день*», – отмечает исполнительный директор Международного энергетического агентства Фатих Бироль.

УДК 629.4.015

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ МАССЫ СОСТАВА НА ПРОДОЛЬНЫЕ СИЛЫ В МЕЖВАГОННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

П. А. САХАРОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Значительные продольно-динамические силы в межвагонных соединениях поездов являются одной из основных причин нарушения безопасности движения. Они способны привести к выжиманию или выдергиванию вагонов из рельсовой колеи, расшивке или сдвигу железнодорожного пути. Это особенно актуально для грузовых поездов большой массы и длины. Оценка влияния неоднородности массы состава на величину и распределение продольных сил в поездах позволит выработать рекомендации по их снижению и повышению безопасности движения.

Для решения поставленной задачи разработана компьютерная модель поезда, учитывающая контактное взаимодействие автосцепок в межвагонных соединениях и характеристики поглощающих аппаратов вагонов. Математическое описание модели и ее реализация в программном комплексе MSC.ADAMS представлены в работе [1]. Поезд моделируется в виде цепочки абсолютно твердых тел (локомотива, вагонов и автосцепок), на которые наложены геометрические связи, обеспечивающие их прямолинейное движение вдоль трассы железнодорожной линии без вертикальных колебаний и угловых перемещений. Между вагонами и автосцепками установлена взаимосвязь, моделирующая работу поглощающих аппаратов, а между смежными автосцепками – модель контактного взаимодействия. Компьютерная модель позволяет оценивать продольную динамику поездов при отличающихся массах и длинах вагонов в составе, характеристиках амортизаторов и зазорах в связях. Обеспечивается возможность регулирования зазоров на стадии формирования ис-

ходных данных и моделирования ситуаций сжатого или растянутого поезда, что существенно упрощает подготовку к вычислительным экспериментам и повышает их точность [1].

С помощью разработанной компьютерной модели исследовано влияние неоднородности состава поезда по массе на продольно-динамические силы между вагонами при торможении локомотивом. Рассмотрены четыре различных варианта распределения массы вагонов по длине состава. В первом варианте масса вагонов по линейной зависимости плавно уменьшается в направлении от головы поезда к его хвосту. При этом масса первого вагона составляет 100 т, а последнего – 24 т. Во втором варианте масса вагонов плавно увеличивается от 24 т в голове поезда до 100 т в его хвосте. В третьем варианте моделируется ситуация, когда в голове и хвосте поезда расположены порожние вагоны массой по 24 т, а в центре – груженые массой 100 т. Изменение массы, как и в предыдущих вариантах, описывается линейной зависимостью. В четвертом варианте рассмотрена ситуация расположения порожних вагонов в центре поезда. Масса вагонов в этом случае снижается со 100 т в начале состава до 24 т в его середине, а затем снова увеличивается к последнему вагону до 100 т.В каждом из четырех вариантов состав поезда включает 100 вагонов. Их суммарная масса во всех вариантах одинакова и составляет 6200 т. В расчетах каждое межвагонное соединение представляется упруго-вязкой связью с коэффициентом жесткости C = 40 МН/м и коэффициентом демпфирования K = 100 кН·с/м. Зазоры в связях отсутствуют, то есть рассматривается ситуация торможения предварительно сжатого поезда. Тормозная сила локомотива в течение одной секунды увеличивается от нуля до максимального значения, составляющего 500 кН. По результатам моделирования построены зависимости распределения максимальных продольных сил по длине поезда, представленные на рисунке 1, *а*.

Для всех вариантов расчета продольные силы в поезде превысили силу торможения на 30 % и более. Это подтверждает, что неоднородность поездов по массе способствует росту продольно-динамических сил. Наибольшие силы, превышающие тормозную на 60–77 %, возникли при 2-м и 3-м вариантах распределения массы вагонов в составе. Общим в обоих вариантах является наличие порожних вагонов в голове поезда. При их расположении в центре поезда максимальные силы возникают во второй четверти состава, что приводит к 40%-му превышению тормозной силы.

Очевидно, что рост продольных сил в неоднородных по массе поездах связан с набеганием более тяжелых вагонов на более легкие. Последние обладают меньшей инерционностью, быстрее реагируют на тормозное воздействие со стороны локомотива и снижают скорость своего движения. В результате разность скоростей взаимодействующих тел увеличивается вместе с увеличением разности их масс, что и приводит к существенному росту продольно-динамических сил.

а) *б*)

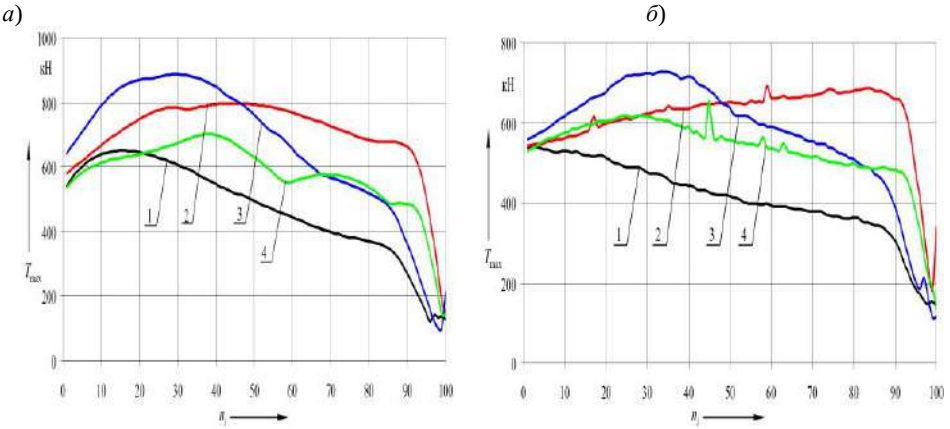


Рисунок 1 – Распределение максимальных продольных сил по длине неоднородного поезда с линейными (*а*) и приближенными к реальным (*б*) силовыми характеристиками поглощающих аппаратов при вариантах распределения массы вагонов в составе: *1* – вариант 1; *2* – вариант 2; *3* – вариант 3; *4* – вариант 4

Рассмотренный пример показал, что менее всего склонны к росту продольных сил однородные по массе поезда и неоднородные поезда с постепенно уменьшающейся от головы к хвосту состава массой вагонов. Размещение порожних вагонов в конце поезда способствует уменьшению максимальных сил не только в их автосцепках, но и в части предшествующих груженых вагонов, а любое другое их расположение ведет к росту максимальных сил в межвагонных соединениях. Анализ результатов позволяет сделать вывод, что величина отклонения максимальных продольно-динамических сил в поезде

от силы торможения локомотива находится во взаимосвязи с количеством порожних и груженых вагонов в составе. С увеличением их числа увеличивается указанное отклонение.

Анализ результатов расчетов показал, что неоднородность поезда по массе оказывает существенное влияние не только на возникающие в межвагоннных соединениях продольные силы, но также на амплитуду и период продольных колебаний поезда. При одинаковом количестве вагонов в составе и их суммарной массе амплитуда колебаний тем больше, чем дальше от локомотива, реализующего тормозную силу, находится центр масс поезда. При этом нарушается наблюдаемая в однородном поезде непосредственная взаимосвязь между максимальными продольными силами в межвагонных соединениях и амплитудой продольных колебаний поезда, так как последняя в этом случае определяется не только значениями наибольших сил, но и количеством вагонов, между которыми указанные силы действуют.

Представленные на рисунке 1, *а* результаты расчетов получены с учетом характеристик межвагонных соединений, существенно отличающихся от реальных. На практике демпфирующие свойства поглощающих аппаратов вагонов существенно выше и в большей степени способствуют гашению колебаний. В связи с этим выполнен аналогичный вычислительный эксперимент, отличающийся учетом приближенных к реальным силовых характеристик поглощающих аппаратов. Коэффициенты жесткости для линий нагрузки и разгрузки силовых характеристик приняты различными: при нагружении $C_н$ = 40 МН/м, а при разгрузке $C_р$ = 10 МН/м. Результаты расчетов представлены на рисунке 1, *б*. Учет диссипативных свойств реальных поглощающих аппаратов привел к снижению максимальных продольных сил в поезде и подтвердил все выводы, сделанные ранее.

Таким образом, неоднородность поезда по массе способствует увеличению амплитуды продольных колебаний поезда и сил в его межвагонных соединениях. В зависимости от массы состава, числа порожних вагонов и их расположения продольные силы между вагонами могут превышать тормозную силу локомотива на 30–77 %, что находит подтверждение в работе [2].

Список литературы

1 **Сахаров, П. А.** Расчетно-экспериментальный метод исследования продольной динамики поезда / П. А. Сахаров // Механика. Исследования и инновации : сб. науч. тр. / Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель, 2020. – Вып. 13. – С. 128–140.

2 **Shimanovsky, A.** Investigation of the longitudinal track profile influence on the forces acting in the train inter-car connections using the MSC.ADAMS software / A. Shimanovsky, P. Sakharau // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – Vol. 2353. – P. 555–569.

УДК 628.16.08:628.147.2

О ПУТЯХ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ И ВОДОТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И РЕМОНТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

М. Н. ТОРОПОВ, Н. В. ВАСИЛЬЕВ
Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва

Проанализированы недостатки современных технологий на базе применения ингибиторных комплексов для защиты систем с гетерофазным рабочим телом от коррозии.

В сводной инструкции по применению охлаждающих жидкостей (ОЖ) – ПКБЦТ 25.088 указаны 6 видов водоподготовки, в т. ч. для ингибиторных комплексов ИНКОРТ-8МЗ и DUFSSAFE 120. Следует иметь в виду, что, несмотря на широкое использование указанного комплекса ИНКОРТ-8МЗ (последние 19 лет), не удалось решить проблему выхода из строя секций водоохлаждения вследствие возникновения течей в зимний период и уменьшения их теплопроводности, приводящей к перегреву дизеля в летний период [1].

Причина же подобного явления кроется в неучете роли микробиологической коррозии в процессе коррозионного разрушения конструкций. Бактерии заведомо присутствуют как в тепловых сетях, в т. ч. пассажирских вагонов, так и в системах водоохлаждения дизелей тепловозов [2]. Статистика же внеплановых ремонтов систем охлаждения тепловозов в ОАО «РЖД» за период 2009–2014 годов свидетельствует о трехкратном увеличении их количества за этот период [3].

Совместная работа РУТ (МИИТ) и Института океанологии имени П. П. Ширшова РАН позволила установить, что 40 % разрушения конструкций происходит именно из-за микробиологической

коррозии, обусловленной жизнедеятельностью железопродуцирующих бактерий [4]. О том, что эти бактерии жизнеспособны до температур 80–85 °С свидетельствуют работы специалистов института микробиологии РАН [5]. Биоржавчина значительно уменьшает теплоотдачу материала. Создаются идеальные условия для развития под бугорком электрохимической коррозии. Кроме того, возникают термические напряжения, исчерпываются упругопластические свойства материала и происходит разрушение конструкций.

Для борьбы с микробами нужны окислители. Ввод в ингибиторы хромпика делают ОЖ токсичной, что не соответствует ГОСТам на двигатели судовые, тепловозные, промышленные [6, 7].

В пассажирских вагонах изучались существующие системы водотеплоснабжения: с системами отопления на воде, этиленгликолем, с 7 модификациями электрооборудования, выполненного различными производителями.

При использовании воды отмечены низкий ресурс эксплуатации систем вследствие использования рабочего тела, обладающего высокой коррозионностью, жесткостью, щелочностью, солесодержанием; повышенным расходом ТЭР и несоответствием качества используемой воды по таким важным показателям, как содержание железа и взвесей.

Основу антифризов составляют этиленгликоль или полипропиленгликоль. Известно, что водные растворы этих компонентов химически агрессивны и вызывают коррозию деталей, выполненных из черных и цветных металлов и сплавов. Кроме того, этиленгликоль очень токсичен. Ввиду этого в состав антифриза вводят ингибиторы, антивспенивающие и стабилизирующие вещества.

Даже при нормальной эксплуатации в антифризе происходит постепенное снижение содержания присадок, и коррозия металлических деталей усиливается. При этом возможно появление отложений в системах. Так, было выявлено на эксплуатируемых вагонах появление взвесей в антифризе в пределах от 703 до 20180 мг/л. Отмечено, что, если антифриз разбавить водой даже в небольшой пропорции, защитная пленка разрушается и металл коррозируется в гораздо большей степени, чем если бы вместо антифриза была залита вода.

Решению этих проблем способствует технология энергетического метода водоподготовки, разработанная более 20 лет назад и серийно внедренная на энергетических установках (опасные промышленные объекты) и системах водотеплоснабжения и охлаждения оборудования ремонтных предприятий и подвижном составе. Технология является природоподобной межотраслевой, сквозной, положительно зарекомендовавшей себя во многих отраслях экономики [8]. В рамках единой технологии она позволяет решать технологические, экологические и социальные задачи при минимально возможных материальных и финансовых затратах, способствуя уменьшению коррозионности жидкой среды и интенсивности ее соле- и накипеобразования. С ее применением возможно продлить срок эксплуатации системы не менее чем до 50–70 лет и получить соответствие рабочего тела системы действующим нормативным документам.

Отмечена возможность использования технологии на любом виде жидкости (морская, пресная вода, в том числе и питьевая, химрастворы, в т. ч. и этиленгликоль, нефтепродукты и т. д. Доказана совместимость метода с использованием традиционных технологий [9]. Обработка производится на действующих объектах без разборки систем и без прерывания технологических процессов эксплуатации и перевозки пассажиров с улучшением характеристик жидкого рабочего тела, повышением физико-химических свойств конструкционных материалов, используемых в системах. Исключаются случаи разрушения конструкционных материалов, в т. ч. резинотехнических изделий, цветных металлов и т. д. в процессе эксплуатации систем.

Технология отмечена пятью золотыми медалями на международных выставках, посвященных улучшению качества воды, в том числе и питьевой. Работа по этой тематике на международной научной конференции «Проблемы механики современных машин», организованной Институтом машиноведения им. академика А. А. Благонравова РАН в 2025 году отмечена призовым местом среди 48 докладов специалистов МГУ, МВТУ, МАИ, восьми академических структур РАН.

Список литературы

1 Так ли небезопасны ингибиторные комплексы для систем водоохлаждения дизелей тепловозов / М. Н. Торопов, А. С. Селиванов, Н. В. Васильев [и др.] // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 1. – С. 11–18.

2 Повышение ресурса и надежности систем водотеплоснабжения пассажирских вагонов на основе разработки энергоэффективной экологичной технологии водоподготовки / М. Н. Торопов, И. Е. Перков, А. С. Селиванов [и др.]. – Наука и техника транспорта. – 2022. – № 3. – С. 41–49.

3 **Горин А. В.** Методы контроля технологического состояния охлаждающих устройств тепловозов в эксплуатации: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : дис. … канд. техн. наук / Горин Антон Владимирович. – М., 2016.

4 Единая природоподобная технология решения многофакторных задач систем водотеплоснабжения и охлаждения различного оборудования / М. Н. Торопов, А. С. Селиванов, И. Е. Перков, Ф. В. Сапожников // Инженерные системы. АВОК-Северо-Запад. – 2023. – № 4. – С. 38–48.

5 Микроорганизмы в тепловых сетях и внутренняя коррозия стальных трубопроводов / Е. П. Розанова, Г. А. Дубинина, Е. В. Лебедева, Л. А. Назаренко // Микробиология. – 2003. – Т 72, № 2. – С. 212–213.

6 ГОСТ 10150-88. Дизели судовые, тепловозные и промышленные. Общетехнологические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 42 с.

7 ГОСТ 10150-2014. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Общие технические условия. – Введ. 01.01.2016. – М. : Стандартинформ, 2015. – 37 с.

8 **Торопов, М. Н.** Концепция научно-технологического развития транспортного комплекса РФ и износ систем с гетерофазным рабочим телом / М. Н. Торопов // Наука и техника транспорта. – 2026. – № 2. – С. 40–47.

9 Уменьшение электрохимической и микробиологической коррозии в с и системах водоохлаждения дизелей локомотивов в рамках единой технологии – энергетического метода водоподготовки (ЭМВ) / М. Н. Торопов, Н. В. Васильев, А. С. Селиванов, И. Е. Перков // Наука и техника транспорта. – 2023. – № 1. – С. 8–18.

10 Природоподобная технология решения проблемы износа систем с гетерофазным рабочим телом / М. Н. Торопов, Н. В. Васильев, Ф. В. Сапожников, И. Е. Перков // Инженерные системы. АВОК-Северо-Запад. – 2025. – № 4. – С. 50–58.

УДК 006.015.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ К ОСЯМ КОЛЕСНЫХ ПАР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

З. Ю. ТРЕТЬЯК, Е. М. АЛЬХОВСКАЯ, Н. М. ПЕРЕКРЕСТОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

К сфере применения технического регламента Евразийского экономического союза ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава» [1] относится железнодорожный подвижной состав со скоростями движения до 200 км/ч включительно и его составные части.

Подтверждение соответствия составных частей железнодорожного подвижного состава требованиям [1] обеспечивается применением требований стандартов, включенных в перечень международных и региональных (межгосударственных) стандартов, в результате использования которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований [1] (утвержден Решением Коллегии Евразийской экономической комиссии от 16.07.2024 № 81) либо выполнения требований [1] непосредственно.

Требования безопасности к осям колесных пар железнодорожного подвижного состава.

Перечень объектов технического регулирования, включающий оси колесных пар железнодорожного подвижного состава, на которые распространяются требования [1] содержит:

– оси вагонные чистовые;

– оси локомотивные и моторвагонного подвижного состава чистовые;

– оси черновые для железнодорожного подвижного состава;

– оси чистовые для специального железнодорожного подвижного состава.

Форма подтверждения соответствия осей колесных пар железнодорожного подвижного состава – сертификация.

Стандартами, определяющими требования безопасности к осям колесных пар являются [2–5].

При проектировании и производстве осей железнодорожного подвижного состава согласно [1] необходимо обеспечить:

– безопасную эксплуатацию с учетом механических факторов и климатических воздействий;

– прочность при допустимых режимах нагружения;

– отсутствие пластических деформаций при продольных и вертикальных предельных динамических нагрузках;

– запас статической прочности и коэффициент запаса сопротивления усталости, не допускающие образование трещин осей колесных пар железнодорожного подвижного состава в течение назначенного срока службы и (или) до достижения назначенного ресурса.

Требования безопасности к осям черновым для железнодорожного подвижного состава.

Черновая ось – ось, полученная методом горячего деформирования из осевой заготовки, подвергнутая термической обработке, имеющая припуски для окончательной механической

обработки и прошедшая неразрушающий контроль [2]. Черновые оси изготавливаются из марки стали ОС способом ковки.

С целью выполнения требований безопасности при изготовлении черновых осей проводится оценка допусков формы и расположения поверхностей, геометрических размеров, химического состава стали черновой оси, механических свойств черновой оси (временное сопротивление разрыву, предел текучести, относительное удлинение, ударная вязкость), макроструктуры, микроструктуры металла черновых осей. Каждая черновая ось при приемо-сдаточных испытаниях, в соответствии с [2], подвергается ультразвуковому контролю на прозвучиваемость и на отсутствие внутренних дефектов.

При эксплуатации колесных пар проводятся ремонт и техническое обслуживание осей в соответствии с руководящими документами по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами, в которых регламентируются предельные нормы износа, наличие протертостей, механических (забоины и вмятины) и термомеханических (сварочные ожоги) повреждений.

Таким образом, требования безопасности к осям колесных пар железнодорожного подвижного состава охватывают весь жизненный цикл продукции – от проектирования, контроля осевых заготовок, производства до эксплуатации и утилизации продукции. Требования безопасности регламентированы техническим регламентом [1], стандартами, нормативными документами.

При сертификации осей колесных пар, для оценки выполнения требований безопасности, проводятся сертификационные испытания в аккредитованных испытательных лабораториях (центрах) по программам, разработанным органом по сертификации и устанавливающим виды испытаний, состав и объем проверяемых сертификационных показателей.

В качестве примера в таблице 1 приведены требования безопасности [1] к осям черновым железнодорожного подвижного состава.

Таблица 1 – **Требования безопасности и сертификационные показатели осей черновых для железнодорожного подвижного состава [1]**

Обозначение документа, определяющего показатель	Показатель
Требование безопасности 1. При проектировании и производстве осей железнодорожного подвижного состава необходимо обеспечить: безопасную эксплуатацию с учетом внешних климатических и механических воздействий, прочность при допустимых режимах нагружения и воздействии, отсутствие пластических деформаций при продольных и вертикальных предельных динамических нагрузках, сопротивление усталости при малоцикловых и многоцикловых режимах нагружения. Выбранные проектировщиком (разработчиком) конструкции осей железнодорожного подвижного состава должны быть безопасны в течение назначенного срока службы и (или) до достижения назначенного ресурса, в течение назначенного срока хранения, а также выдерживать воздействия и нагрузки, которым они могут подвергаться в процессе эксплуатации.	
ГОСТ 4728-2010, пункт 4.2	Химический состав стали
ГОСТ 4728-2010, пункт 4.7	Макроструктура заготовок
ГОСТ 33200-2014, пункт 6.1.3	Степень укова или обжатия металла
ГОСТ 33200-2014, пункт 6.1.6 (для образцов из подступичной части)	Механические свойства
ГОСТ 33200-2014, пункт 6.1.11	Загрязненность стали неметаллическими включениями
ГОСТ 33200-2014, пункт 6.1.12	Микроструктура металла
ГОСТ 33200-2014, пункт 6.1.13.1	Прозвучиваемость
Требование безопасности 2. В эксплуатационных документах осей железнодорожного подвижного состава должны содержаться рекомендации по безопасной утилизации по истечении назначенного срока службы (достижении назначенного ресурса).	
Пункт 4.13 (четвертое перечисление) ГОСТ 2.601-2013	Наличие порядка утилизации в эксплуатационной документации
Требование безопасности 3. На оси железнодорожного подвижного состава должны быть нанесены необходимые (хорошо различимые) идентификационные и предупреждающие надписи и маркировка, сведения из которых дублируются и поясняются в эксплуатационных документах. Колесные пары железнодорожного подвижного состава должны иметь знаки маркировки и клеймения.	
ГОСТ 33200-2014, пункт 6.1.14	Маркировка
Требование безопасности 4. На оси железнодорожного подвижного состава наносится маркировка, обеспечивающая их идентификацию и содержащая в том числе: единый знак обращения продукции на рынке Союза, наименование изготовителя и (или) его товарный знак (при наличии), наименование продукции и (или) обозначение в соответствии с конструкторской документацией, дату изготовления. Маркировка осей железнодорожного подвижного состава должна быть сохранена в течение всего жизненного цикла составных частей железнодорожного подвижного состава. Требования к маркировке указываются в конструкторской документации на продукцию.	
Прямое выполнение пунктов 101 и 106 раздела V ТР ТС 001/2011	Маркировка

Соответствие осей черновых для железнодорожного подвижного состава требованиям [1] обеспечивается путем выполнения требований стандартов ГОСТ 3200-2014, ГОСТ 4728-2010, ГОСТ 2.601-2013, включенных в перечень стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований [1], а также путем непосредственного выполнения требований пунктов 100, 106 [1]. Требования безопасности для осей вагонных чистовых, осей локомотивных и моторвагонного подвижного состава чистовых, осей чистовых для специального железнодорожного подвижного состава могут быть установлены аналогичным образом.

Список литературы

1 ТР ТС 001/2011. О безопасности железнодорожного подвижного состава / Евразийская экономическая комиссия. – Минск : БелГИСС, 2022. – 48 с.

2 ГОСТ 33200-2014. Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. – Минск : Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2014. – 50 с.

3 ГОСТ 4728-2010. Заготовки осевые для железнодорожного подвижного состава. Технические условия. – Минск : Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2010. – 8 с.

4 ГОСТ 11018-2011. Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. – Минск : Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2011. – 26 с.

5 ГОСТ 31847-2012. Колесные пары специального подвижного состава. Общие технические условия. – Минск : Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2012. – 22 с.

УДК 669.18:669.046.58

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАФИНИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ РАСПЛАВОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Н. К. ТУРСУНОВ, Т. Т. УРАЗБАЕВ
Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

Литые детали автосцепного устройства железнодорожного подвижного состава из стали 20ГЛ работают при знакопеременных и ударных нагрузках до минус 60 °С. Сера в виде сульфидов снижает их ударную вязкость, поэтому снижение *S* до 0,015 % и ниже является одной из задач рафинирования. Особенность индукционной тигельной печи (ИТП) – «холодный» шлак, который нагревается только от металла и остается гетерогенным. Поэтому рафинирующую способность шлаков в ИТП нельзя переносить из практики дуговых печей и ковшей без термодинамической оценки. Исследования выполнены на ИТП вместимостью 6 т АО «Литейно-механический завод» (рисунок 1).

а) *б*)

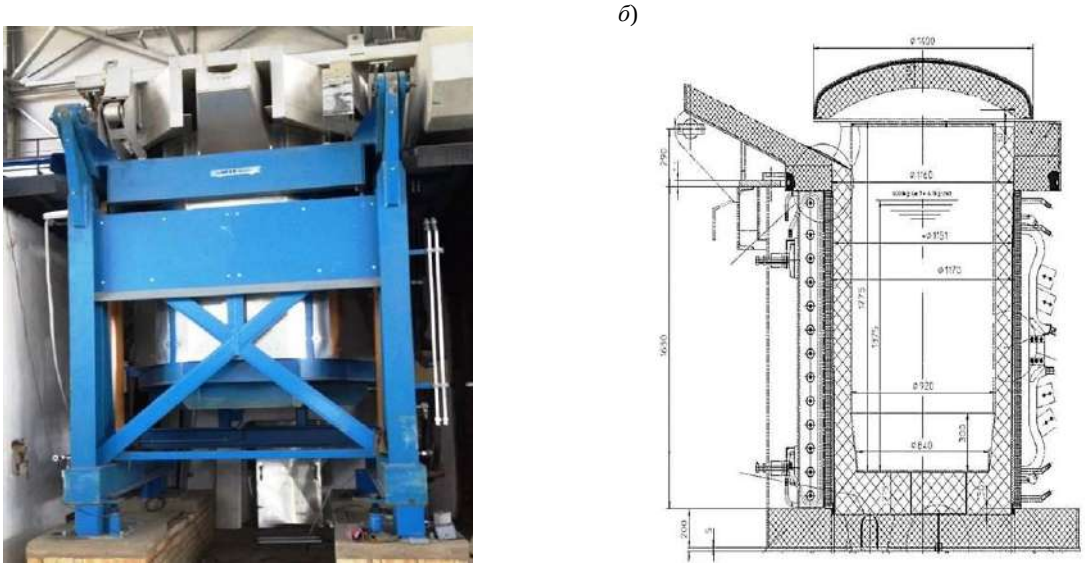


Рисунок 1 – Общий вид (*а*) и схема (*б*) индукционной тигельной печи вместимостью 6 т

Для оценки использована концепция оптической основности Λ (*Duffy – Ingram*) и уравнение Сосинского – Соммервилла для сульфидной емкости

$$\lg C_S = (22690 - 54640\Lambda) / T + 43{,}6\Lambda - 25{,}2.$$

Коэффициент распределения серы рассчитывали как $\lg L_S = \lg C_S + \lg f_S - \lg a_O - 935/T + 1{,}375$, где активность кислорода задается содержанием FeO в шлаке. Рассмотрены пять шлаков: действующий известково-плавиковошпатовый (Ш1), кальций-алюминатный флюс КРФ-90 (Ш2), их модификации (Ш3, Ш5) и смесь КРФ-90 с $CaO–CaF_2$ в соотношении 1:1 (Ш4). Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – **Рафинирующая способность шлаков при 1600 °С**

Шлак	Λ	$\lg C_S$	L_S
Ш1 – $CaO–CaF_2$ (действующий)	0,798	–1,58	35
Ш2 – КРФ-90	0,765	–2,06	20
Ш3	0,756	–	15
Ш4 – КРФ-90 + $CaO–CaF_2$ (1:1)	0,836	–1,02	182
Ш5	0,781	–	68

Чистый флюс КРФ-90 имеет пониженную сульфидную емкость, а наибольшую рафинирующую способность показывает шлак Ш4, который при расходе 10–14 кг/т обеспечивает $S \le 0{,}009$ %. Оптическая основность Ш4 немного выходит за область применимости уравнения, поэтому результат проверен уравнением [3], справедливым при $\Lambda > 0{,}8$. Оно дает более осторожную оценку $\lg C_S \approx -1{,}50$, но и в этом случае Ш4 превосходит действующий шлак, а расчетное [*S*] не превышает 0,015 %.

Расчет показал, что главным резервом десульфурации в ИТП является не основность, а окисленность шлака: снижение FeO с 3 до 0,5 % увеличивает L_S примерно в 6 раз. При глубоком раскислении металла алюминием предельный L_S всех шлаков возрастает на порядок, причем шлак Ш4 сохраняет преимущество во всём диапазоне [Al] (рисунок 2). Это подтверждено промышленными плавками: после предварительного раскисления металла алюминием (10 кг на плавку), присадки 50–60 кг КРФ-90 и донной продувки аргоном 11,2–12,5 нл/мин содержание серы снизилось до 0,022 % за 20 мин (по действующей технологии – 0,025 % за 35 мин). Калибровка кинетической модели по этим данным дала эффективный $L_S = 67…80$, что соответствует снижению FeO до ≈0,2 % (рисунок 3). Прогноз для шлака Ш4 показывает возможность получения $S = 0{,}005…0{,}011$ %.

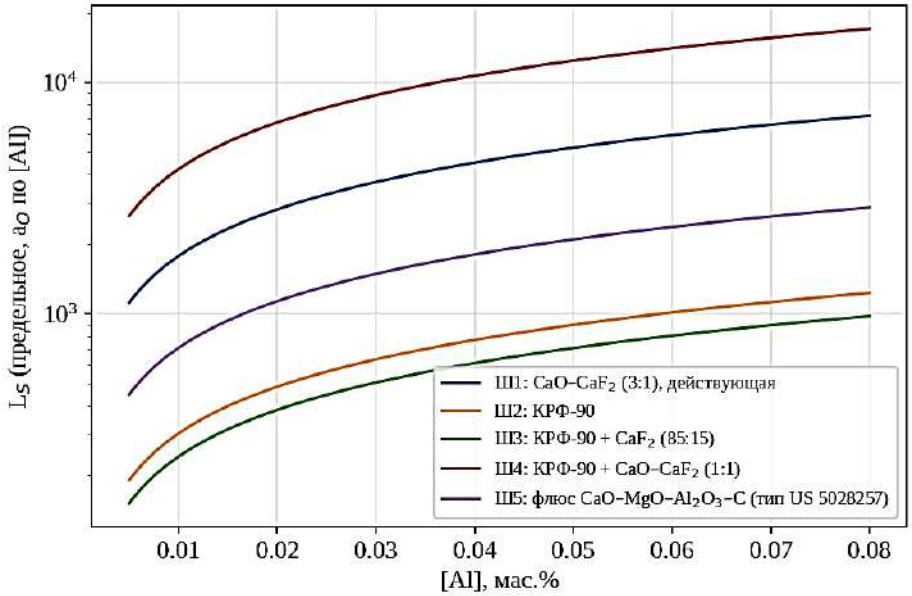


Рисунок 2 – Предельный коэффициент распределения серы (CaO по равновесию с алюминием) в зависимости от содержания алюминия в стали (1873 К)

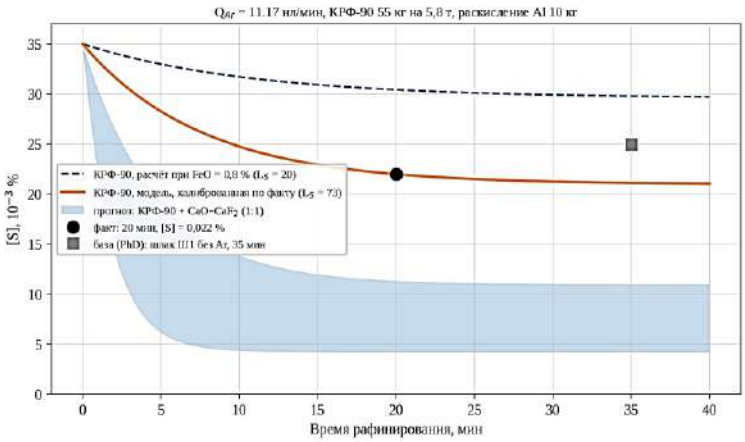


Рисунок 3 – Кинетика десульфурации стали 20ГЛ в ИТП 6 т при донной продувке аргоном и рафинировании флюсом КРФ-90: фактические данные и расчет по модели

Таким образом, управление десульфурацией стали 20ГЛ в ИТП должно строиться на двух параметрах: оптической основности шлака (выбор состава смеси) и его окисленности (глубокое раскисление металла перед наведением шлака). Предложенный подход является элементом научных основ управления процессами рафинирования железоуглеродистых расплавов при производстве литых деталей подвижного состава.

Список литературы

1 **Sosinsky, D. J.** The composition and temperature dependence of the sulfide capacity of metallurgical slags / D. J. Sosinsky, I. D. Sommerville // Metallurgical Transactions B. – 1986. – Vol. 17B. – P. 331–337.

2 **Duffy, J. A.** An interpretation of glass chemistry in terms of the optical basicity concept / J. A. Duffy, M. D. Ingram // Journal of Non-Crystalline Solids. – 1976. – Vol. 21. – P. 373–410.

3 Use of optical basicity concept for determining phosphorus and sulphur slag–metal partitions / R. W. Young, J. A. Duffy, G. J. Hassall, Z. Xu // Ironmaking and Steelmaking. – 1992. – Vol. 19, № 3. – P. 201–219.

4 Thermodynamic analysis of the processes of deoxidation and desulfurization of 20GL grade steel / N. K. Tursunov, N. K. Kodirova, Z. F. Rakhmatova, T. T. Urazbaev // Journal of Transport. – 2025. – Vol. 2, is. 4. – P. 268–272.

5 **Турсунов, Н.** Теоретические и экспериментальные исследования процесса десульфурации металла с использованием твердых шлаковых смесей при выплавке стали 20ГЛ в индукционной тигельной печи / Н. Турсунов, А. Саидирахимов // Вестник транспорта – Transport xabarnomasi. – 2025. – № 2 (1). – С. 220–227.

6 **Турсунов, Н. К.** Исследование в лабораторных условиях и индукционной тигельной печи вместимостью 6 тонн режимов рафинирования стали 20 ГЛ с целью повышения ее качества / Н. К. Турсунов, А. Е. Сёмин, Э. А. Санокулов // Тяжелое машиностроение. – 2017. – № 1–2. – С. 47–54.

УДК 669.187.2:621.365.5

ГИДРОДИНАМИКА ДОННОЙ ПРОДУВКИ АРГОНОМ СТАЛЬНОГО РАСПЛАВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Н. К. ТУРСУНОВ, Т. Т. УРАЗБАЕВ
Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

В индукционной тигельной печи (ИТП) металл интенсивно перемешивается электромагнитным полем, поэтому эффект донной продувки инертным газом часто оценивают только по опыту. Для обоснованного выбора режима продувки при выплавке стали 20ГЛ для литых деталей подвижного состава нужна количественная модель гидродинамики ванны. На АО «Литейно-механический завод» ИТП вместимостью 6 т оснащена системой донной продувки аргоном через газопроницаемый блок в подине тигля (рисунок 1).

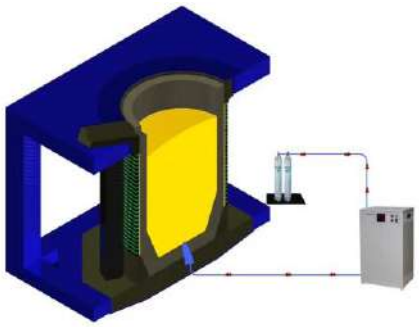


Рисунок 1 – Трехмерная схема системы донной продувки аргоном индукционной печи

Для ИТП вместимостью 6 т сопоставлены электромагнитная и газовая составляющие мощности перемешивания. Газовую мощность рассчитывали по работе расширения всплывающего газа, электромагнитную – по параметрам индуктора. Размер пузырей, скорость газожидкостного факела и площадь «открытого глаза» определяли по известным корреляциям для газоперемешиваемых ванн (таблица 1).

Таблица 1 – **Параметры продувки ванны ИТП 6 т**

Параметр	Скорость продувки, нл/мин	
	3	30
Мощность газового перемешивания, Вт/т	4	36
Мощность электромагнитного перемешивания, Вт/т	≈59	≈59
Диаметр пузырей, мм	6	20
Скорость факела, м/с	0,38	0,81
Площадь «открытого глаза», % зеркала	6	42

При реальных расходах аргона газовая мощность меньше электромагнитной, а время перемешивания ванны определяется в основном электромагнитным полем (рисунок 2).

Следовательно, роль продувки не в усилении общего перемешивания, а в устранении застойных зон у дна и на оси тигля, в подаче металла к границе «шлак – металл», в обновлении межфазной поверхности и в дегазации.

Кинетическая модель показала, что продувка 10–15 нл/мин увеличивает константу скорости десульфурации на 19–27 %. Модель популяционного баланса неметаллических включений, учитывающая турбулентную и стоксову коагуляцию, флотацию пузырями, перенос к шлаку и вторичное окисление, показала снижение стационарного общего кислорода на 11–21 % (рисунок 3). Прямая флотация включений пузырями в ИТП малоэффективна; основной механизм – вынос металла к шлаку газовым факелом и коагуляция. Оптимальный расход аргона существует, поскольку при большом расходе растет «открытый глаз» и усиливается вторичное окисление металла. Для заметной дегазации требуется продувка в течение всей плавки: для снижения азота на 20 ppm – около 0,34 м³/т аргона.

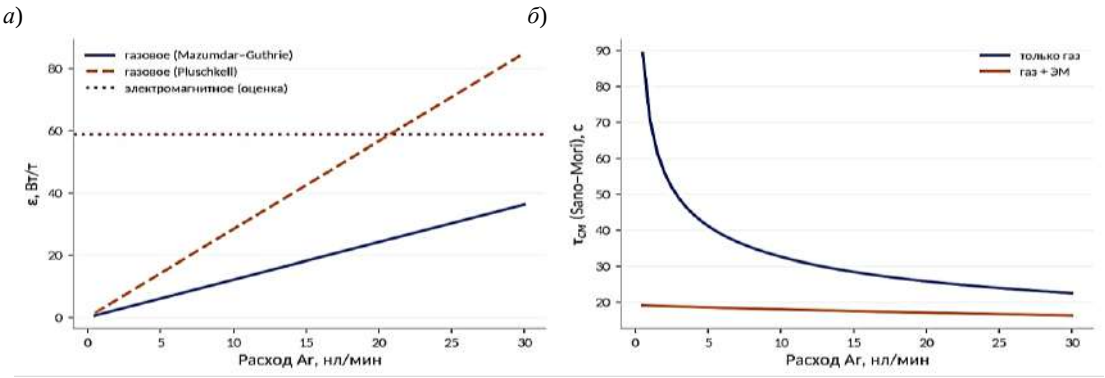


Рисунок 2 – Удельная мощность (*а*) и время (*б*) перемешивания ванны ИТП 6 т в зависимости от расхода аргона

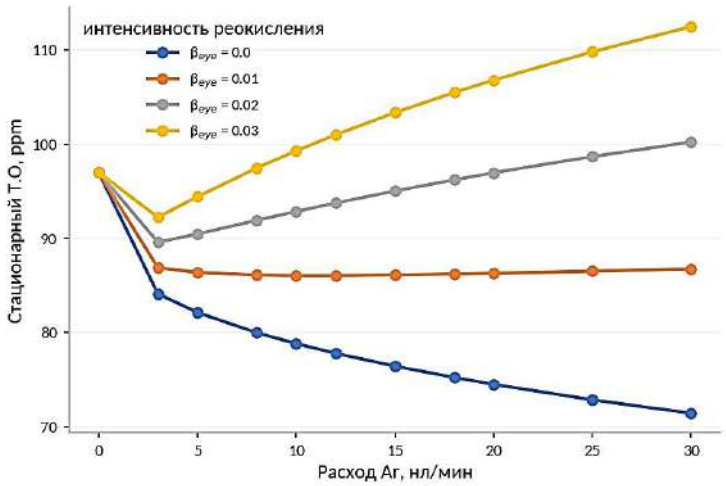


Рисунок 3 – Стационарное содержание общего кислорода в зависимости от расхода аргона при различной интенсивности вторичного окисления через раскрытое зеркало

На этой основе сформулирован принцип управления продувкой по периодам плавки: защитный режим 3–5 нл/мин при спекании футеровки и расплавлении, рабочий режим 10–15 нл/мин в течение 15–20 мин при рафинировании под жидким шлаком и гомогенизирующий режим 3–5 нл/мин перед выпуском. Для ротаметров, градуированных по воздуху, обоснован поправочный коэффициент 0,852. Внедрение донной продувки на АО «Литейно-механический завод» сократило время спекания футеровки на 45 %, время плавки на 12,5 % и увеличило стойкость футеровки на 33 %.

Список литературы

1 **Mazumdar, D.** The physical and mathematical modelling of gas stirred ladle systems / D. Mazumdar, R. I. L. Guthrie // ISIJ International. – 1995. – Vol. 35, № 1. – P. 1–20.

2 **Zhang L.** State of the art in evaluation and control of steel cleanliness / L. Zhang, B. G. Thomas // ISIJ International. – 2003. – Vol. 43, № 3. – P. 271–291.

3 **Urazbaev, T. T.** Development of an advanced technology for smelting 20GTL steel in an induction furnace with subsequent ladle refining of the metal through argon purging and powder injection / T. T. Urazbaev, N. K. Tursunov, B. A. Abdunazarov // Journal of Transport. – 2026. – Vol. 3, is. 1. – P. 29–32.

4 **Турсунов, Н. К.** Разработка теоретических основ процессов рафинирования и модифицирования металлических расплавов для модернизации технологических режимов плавки / Н. К. Турсунов, Т. Т. Уразбаев, Т. М. Турсунов // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2025. – С. 47–50.

5 **Сёмин, А. Е.** Инновационное производство высоколегированной стали и сплавов. Теория и технология выплавки стали в индукционных печах : учеб. пособие / А. Е. Сёмин, Н. К. Турсунов, К. Л. Косырев. – М. : МИСиС, 2017. – 166 с.

6 **Тоиров, О. Т. У.** Совершенствование технологии внепечной обработки стали с целью повышения ее механических свойств / О. Т. У. Тоиров, Н. К. Турсунов, Л. А. У. Кучкоров // Universum: технические науки. – 2017. – № 4–2 (97). – С. 65–68.

УДК 669.15-196:620.178.152

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ МОДИФИЦИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА КОМПЛЕКСНЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ НА ОСНОВЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Н. К. ТУРСУНОВ, Т. Т. УРАЗБАЕВ
Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

Эффект модифицирования литой стали определяется не только расходом модификатора, но и чистотой металла после рафинирования. Для корпуса автосцепки из стали 20ГЛ важно связать расход модификатора с содержанием примесей, структурой и свойствами и иметь способ быстро проверить результат на каждой отливке. Объект исследования – корпус автосцепки грузового вагона, отливаемый на АО «Литейно-механический завод»; модификатор FeVAlCa вводится в ковш в виде порошковой проволоки (рисунок 1).

а) *б*)



Рисунок 1 – Корпус автосцепки грузового вагона (*а*) и комплексный модификатор FeVAlCa в виде порошковой проволоки (*б*)

Ковшевое модифицирование комплексным модификатором FeVAlCa в количестве 0,18 % массы металла снизило содержание серы с 0,025 до 0,017 %, общего кислорода – с 0,0097 до 0,0038 % и обеспечило [*V*] = 0,035 % при усвоении ванадия 83–91 %. Высокое усвоение объясняется тем, что в раскисленной алюминием стали ванадий не окисляется. Для модифицирования включений необходимо 32–54 ppm кальция. Рассчитанные температуры начала выделения нитридов ванадия (869–964 °С) обосновали режим закалки с выдержкой при 880 °С и отпуском при 500 °С, который обеспечивает структуру сорбита и зерно № 10–12 (рисунок 2).

а) *б*)

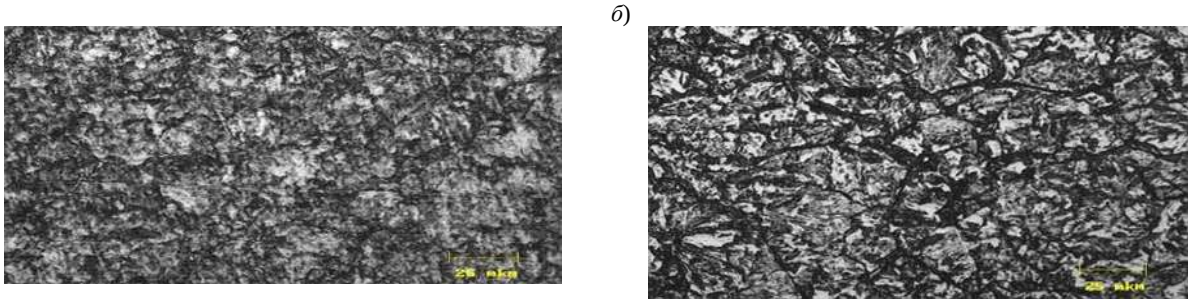


Рисунок 2 – Микроструктура стали 20ГЛ после закалки и отпуска:
а – без модификатора (Al 0,1 %); *б* – Al 0,1 % + FeVAlCa 0,18 %

Установлены регрессионные зависимости свойств от параметров рафинирования и модифицирования:

$$\sigma_в = 903{,}6 - 2{,}99[O]_\Sigma \ (R^2 = 0{,}978);$$
$$\sigma_т = 693{,}7 - 1{,}82[O]_\Sigma \ (R^2 = 0{,}999);$$
$$НВ = 184{,}5 + 1918[V] \ (R^2 = 0{,}924).$$

Зависимости показывают, что основной вклад в прочность вносит чистота металла по кислороду (рисунок 3), а в твердость – содержание ванадия.

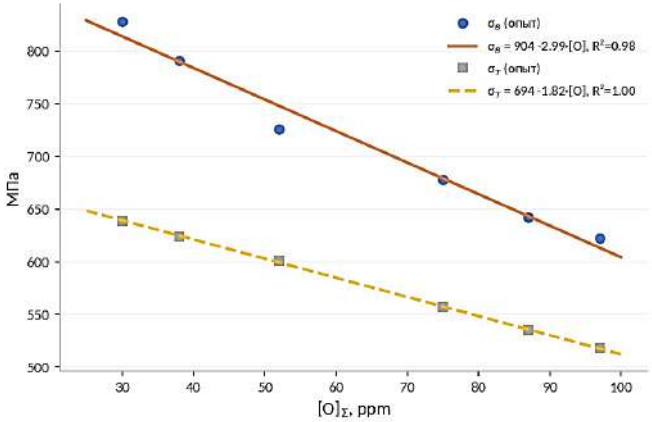


Рисунок 3 – Зависимость временного сопротивления и предела текучести стали 20ГЛ от содержания общего кислорода

Оптимальный диапазон ванадия составляет 0,033–0,038 % (рисунок 4).

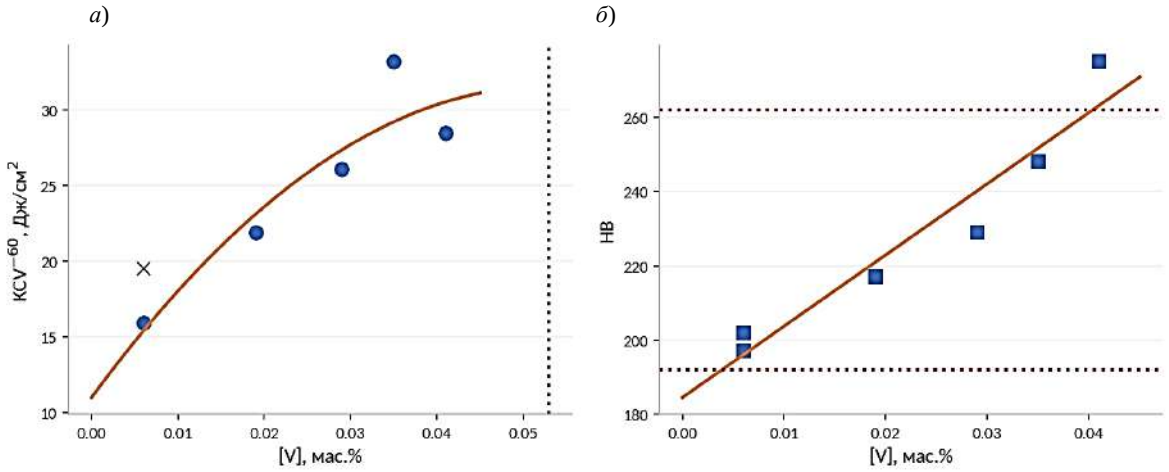


Рисунок 4 – Зависимость ударной вязкости KCV^{-60} (*а*) и твёрдости (*б*) стали 20ГЛ от содержания ванадия

По сравнению с традиционной технологией временное сопротивление выросло на 27 %, предел текучести – на 20,5 %, твердость – на 26 %, ударная вязкость KCV^{-60} – в 2,1 раза. Расчет по уравнению Холла – Петча показал, что прирост предела текучести (106 МПа) почти полностью объясняется измельчением зерна с № 6–8 до № 10–12 (расчет – 107 МПа).

Поскольку твердость стали 20ГЛ однозначно связана с содержанием ванадия и структурой, она выбрана параметром обратной связи. Совместно с Институтом прикладной физики НАН Беларуси разработан портативный динамический твердомер ТПЦ-7Т (рисунок 5). Для стали 20ГЛ коэффициент восстановления скорости однозначно определяется твердостью (e = 0,339…0,412 в диапазоне 192–262 НВ), получены зависимости $\sigma_в$ = 86,6 + 2,754 НВ и $\sigma_т$ = 212,6 + 1,607 НВ. Разработано правило приемки отливок с защитными полосами, учитывающими неопределенность измерений, и корректировка расхода FeVAlCa по средней твердости плавки.

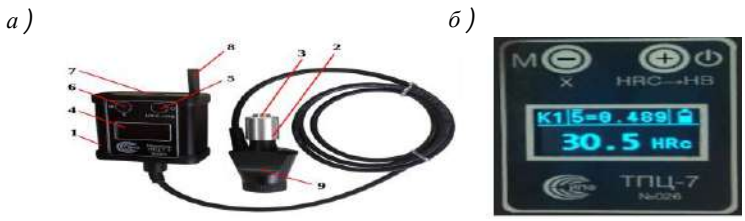


Рисунок 5 – Портативный цифровой твердомер ТПЦ-7Т:
а – общий вид; *б* – дисплей в режиме пользовательской калибровки

Таким образом, цепочка «рафинирование → модифицирование → термообработка → неразрушающий контроль → корректировка расхода модификатора» замыкает контур управления технологией и позволяет получать литые детали подвижного состава с заданной структурой и свойствами.

Список литературы

1 Nondestructive testing of hardness and tensile strength of cast iron by impact instrumented indentation / A. Kren, N. Tursunov, T. Urazbaev [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2026. – DOI: 10.1007/s11665-026-13439-4.

2 Контроль механических характеристик чугуна методом микроударного индентирования / А. П. Крень, Г. А. Ланцман, А. В. Никифоров [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2025. – Т. 16, № 3. – С. 222–234.

3 **Турсунов, Н. К.** Совершенствование технологии производства корпуса автосцепки подвижного состава железнодорожного транспорта / Н. К. Турсунов, Т. Т. Уразбаев, Т. М. Турсунов // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2024. – С. 168–169.

4 ГОСТ 22703-2012. Детали литые сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. – Введ. 01.03.2023. – М. : Стандартинформ, 2013. – 16 с.

УДК 629.4.015

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ГРУЗА С ВАГОНОМ ПРИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЯХ

О. С. ЧАГАНОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

При перевозке тяжеловесных грузов на открытом подвижном составе для обеспечения безопасности движения требуется обеспечить их надежное крепление. Размещение и крепление тяжеловесных грузов на открытом подвижном составе при транспортировке по территории стран, входящих Организацию сотрудничества железных дорог, осуществляется на основе использования Технических условий размещения и крепления грузов (Приложение 3 к СМГС) [1]. В них заложены значения расчетных коэффициентов, которые соответствуют нормальным погодным условиям. В то же время процесс транспортировки может сопровождаться дождем, снегом, сильным ветром, способными привести к неблагоприятному сочетанию сдвигающих сил и коэффициентов трения, при котором рассчитанных по нормам средств крепления окажется недостаточно [2].

Цель представленной работы состоит в анализе достаточности средств крепления тяжеловесного груза при неблагоприятных погодных условиях.

При использовании для расчета крепления тяжеловесного груза брусками по методике, приведенной в [3], используется значение коэффициента трения скольжения между поверхностью груза и полом вагона, равное 0,45. В рассматриваемой схеме крепления масса груза принимается равной 20 т, длина 5,8 м, ширина 2,3 м, высота 1,2 м.

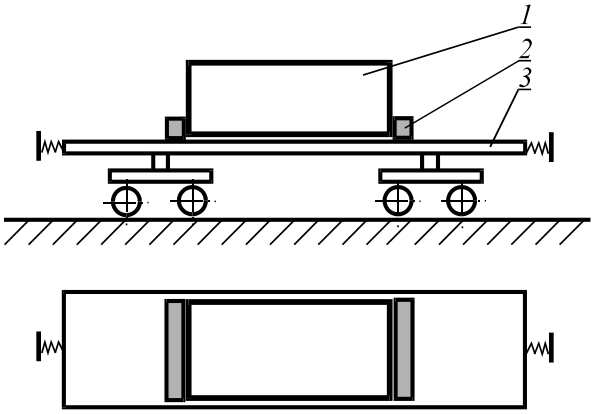


Рисунок 1 – Расчетная схема вагона с грузом:
1 – груз; *2* – упорный брусок; *3* – кузов вагона

Продольная сила инерции рассчитывается в соответствии с основным законом динамики

$$\Phi_{\text{пр}} = \psi_{\text{пр}} g m , \qquad (1)$$

где $\psi_{\text{пр}}$ – удельная величина продольной силы инерции, кН/кН.

В соответствии с Техническими условиями размещения и крепления грузов Приложения 3 к СМГС удельная продольная инерционная сила определяется по формуле, где в зависимости от типа крепления при массе брутто вагона 22 и 94 т соответственно a_{22} = 1,2; a_{94} = 0,97:

$$a_{\text{пр}} = a_{22} - \frac{mg\left(a_{22} - a_{94}\right)}{(Q_{\text{бр94}} - Q_{\text{бр22}})g} = 1,2 - \frac{20 \cdot 9,81(1,2 - 0,97)}{(94 - 22) \cdot 9,81} = 1,14 \text{ кН/кН}.$$

Тогда значение продольной силы инерции

$$\Phi_{\text{пр}} = 1,14 \cdot 20 \cdot 9,81 = 223,67 \text{ кН}.$$

Сила трения в продольном направлении, которая препятствует перемещению груза, опирающегося на один вагон без применения турникетных опор, определяется по формуле

$$F_{\text{тр}}^{\text{пр}} = mg\mu\,, \tag{2}$$

где μ – коэффициент трения между контактирующими поверхностями груза и вагона.

Для расчета принимаем коэффициент трения, равный 0,45. Тогда

$$F_{\text{тр}}^{\text{пр}} = mg\mu = 20 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}45 = 88{,}29 \text{ кН}.$$

Продольные усилия, которые должны восприниматься средствами крепления, определяются по формуле (3). Они учитывают непогашенные трением продольные усилия

$$\Delta F_{\text{пр}} = \Phi_{\text{пр}} - F_{\text{тр}}^{\text{пр}}\,, \tag{3}$$

$$\Delta F_{\text{пр}} = 223{,}67 - 88{,}29 = 135{,}38 \text{ кН}.$$

Также необходимо производить расчет на смятие деревянных упорных брусков. В соответствии с приведенной схемой погрузки и крепления упорный брусок имеет в поперечном сечении размеры 0,1×0,1 м и длину 2,5 м. Тогда получим

$$\sigma = \frac{\Delta F_{\text{пр}}}{pS}\,, \tag{4}$$

где p – количество брусков для крепления груза; S – трение между контактирующими поверхностями груза и вагона;

$$\sigma = \frac{135{,}38 \cdot 10^3}{1 \cdot 0{,}1 \cdot 2{,}5} = 0{,}54 \cdot 10^6 = 0{,}54 \text{ МПа}.$$

Полученное значение напряжения смятия не превышает допустимого напряжения в соответствии с техническими условиями для деревянных брусков [σ] = 11,77 МПа (120 кгс/см^2) [3, таблица 35]. Следовательно, при восприятии упорным бруском продольной нагрузки он не будет сминаться.

Однако при наличии неблагоприятных погодных условий, например, атмосферных осадков, может ухудшиться сцепление груза и пола вагона и, следовательно, уменьшится коэффициент трения. Также в соответствии с Нормами для расчета и проектирования вагонов [3] удельную величину продольной силы можно принять 3,5 кН/кН, что соответствует максимальному ускорению вагона при проектировании. Тогда

$$\Phi_{\text{пр}} = 3{,}5 \cdot 20 \cdot 9{,}81 = 686{,}7 \text{ кН}.$$

Силу трения в продольном направлении определим с учетом того, что коэффициент трения принят 0,1:

$$F_{\text{тр}}^{\text{пр}} = mg\mu = 20 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}1 = 19{,}62 \text{ кН}.$$

Тогда непогашенное трением продольное усилие

$$\Delta F_{\text{пр}} = 686{,}7 - 19{,}62 = 667{,}08 \text{ кН}.$$

Значение напряжения смятия $\sigma = \dfrac{667{,}08 \cdot 10^3}{1 \cdot 0{,}1 \cdot 2{,}5} = 2{,}67 \cdot 10^6 = 2{,}67$ МПа.

Однако и в этом случае полученное значение напряжения смятия не превышает допустимого напряжения в соответствии с техническими условиями для деревянных брусков.

Таким образом, расчеты показывают, что максимальный груз, который может удержать данное крепление, составляет 88 тонн. Данное ограничение может иметь существенное значение для 6- и 8-осных вагонов.

Список литературы

1 Технические условия размещения и крепления грузов. Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) : по состоянию на 1 июля 2015 г. – Минск : Амалфея, 2015. – 704 с.

2 **Ворожун, И. А.** Анализ продольных сил при различных способах размещения длинномерного груза на платформах / И. А. Ворожун, А. В. Ворожун, М. Г. Гегедеш // Механика. Исследования и инновации. – Вып. 17. – С. 40–48.

3 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ – ВНИИЖТ. – М., 1996. – 319 с.

УДК 629.4.027.51

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ВЕЛИЧИНЫ НАТЯГА ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОЛЁСНЫХ ПАР В ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Р. И. ЧЕРНИН, О. М. МОИСЕЙЧИКОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

По результатам проведённых исследований построен сводный график (рисунок 1), который характеризует изменение величины фактического натяга от измеряемого перед сборкой типовых прессовых соединений колёсных пар грузовых и пассажирских вагонов (соединение внутренних колец буксовых подшипников с шейкой оси, напрессовка лабиринтного кольца на предподступичную часть, прессовая посадка цельнокатаного колеса на подступичную часть оси) под воздействием эксплуатационных факторов.

Как видно из рисунка 1, под воздействием эксплуатационных факторов происходит снижение величины натяга в каждом рассматриваемом прессовом соединении, однако наблюдается различная динамика этого снижения, которая обусловлена конструкцией напрессовываемых элементов.

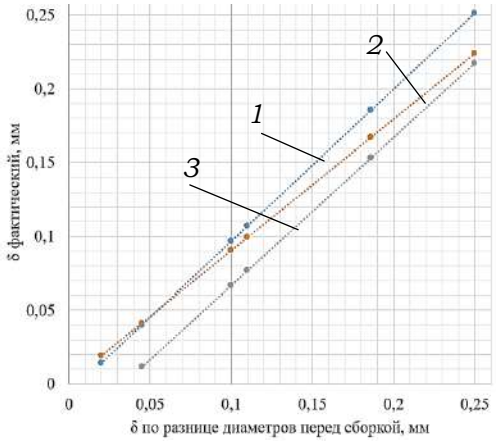


Рисунок 1 – Изменение фактического натяга прессовых соединений:
1 – изменение фактического натяга прессовой посадки внутренних колец буксовых подшипников, $\delta_{факт} = 1{,}0301\ \delta_{досборки} - 0{,}0064$ [1, с. 328];
2 – изменение фактического натяга прессовой посадки лабиринтного кольца, $\delta_{факт} = 0{,}8916\ \delta_{досборки} + 0{,}0012$;
3 – изменение фактического натяга прессовой посадки цельнокатаного колеса, $\delta_{факт} = 1{,}0029\ \delta_{досборки} - 0{,}0335$ [2, с. 46]

Изменение величины натягов в процентном соотношении, а также рекомендованные границы натягов для рассматриваемых прессовых соединений согласно действующим нормам [3] приведены на рисунке 2.

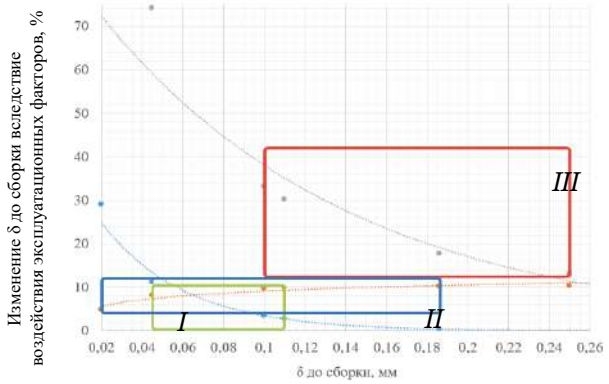


Рисунок 2 – Изменение фактического натяга прессовых соединений в границах, рекомендованных для использования диапазонов:
для соединения внутренних колец буксовых подшипников с шейками осей (I); для соединения лабиринтных колец с предподступичными частями осей (II); для соединения ступицы колеса с подступичной частью оси колёсной пары (III)

В зоне I процентное изменение величины натяга подчиняется зависимости $\Delta\delta_{(\%)} = 0,0414\delta_{\text{досборки}}^{-1,75}$ ($R^2 = 0,979$), в зоне II изменение прочности тепловой напрессовки лабиринтного кольца на предподступичную часть оси $\Delta\delta_{(\%)} = 2,1277\ln(\delta_{\text{досборки}}) + 14$ ($R^2 = 0,8952$), а в зоне III изменение прочности механической напрессовки цельнокатаного колеса на подступичную часть оси $\Delta\delta_{(\%)} = 3,2377\delta_{\text{досборки}}^{-1,75}$ ($R^2 = 1$).

Следует отметить, что зависимости снижения прочности напрессовки внутренних колец буксовых подшипников на шейки осей и напрессовки цельнокатаного колеса на подступичную часть оси колёсной пары демонстрируют схожий характер. Это можно объяснить тем, что и внутренние кольца по отношению к шейки осей и ступица колеса по отношению к подступичной части оси подпадают под определение толстостенных цилиндров, для которых выполняется требование – отношение толщины стенки цилиндра к внутреннему диаметру не менее 1/20 (0,05). Данное соотношение для прессового соединения внутренних колец буксовых подшипников с шейкой оси колёсной пары: 14 / 130 = 0,108; для ступицы колеса, напрессованной на подступичную часть оси 37 / 194 = 0,191; для напрессовки лабиринтного кольца: 8/165 = 0,048. Следовательно, лабиринтное кольцо в этом соединении является тонкостенным цилиндром. Этим можно объяснить различие в динамике изменения прочности прессового соединения лабиринтного кольца с предподступичной частью оси колёсной пары.

Список литературы

1 **Чернин, Р. И.** Оценка влияния эксплуатационных факторов на прочность сопряжения внутренних колец буксовых подшипников с шейкой оси колёсной пары / Р. И. Чернин, А. В. Путято, Р. В. Рахимов // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы : материалы Четвертой Междунар. науч.-техн. конф. (Ташкент, 16–19 апреля 2025 г.). – Ташкент : ТГТУ, 2025. – С. 318–330.

2 **Чернин, Р. И.** Теоретическая оценка прочности прессового соединения цельнокатаного колеса с осью вагонной колёсной пары в процессе эксплуатации / Р. И. Чернин // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии : сб. науч. ст. – Минск : БНТУ, 2026. – Вып. 8. – С. 45–51.

3 Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм (РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017). – 253 с.

УДК 629.4.027.11:621.822.614:620.179.1

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ПОДШИПНИКОВ БУКСОВЫХ УЗЛОВ ФИТИНГОВЫХ ПЛАТФОРМ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ЧЭНЬ ЦЗИНЬТАО

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Подшипники буксовых узлов на железнодорожных фитинговых платформах работают в тяжёлых условиях: они подвергаются высокоударным взаимодействиям колеса и рельса, знакопеременным нагрузкам и сложным тепловым колебаниям во время сборки, наладки и пробной эксплуатации. Ограниченные возможности установки датчиков и изменяющиеся пути передачи сигналов создают сильный фоновый шум, из-за чего мониторинг только вибрации или только температуры недостаточен для раннего выявления неисправностей [1].

Традиционная обработка вибраций с помощью эмпирической модовой декомпозиции (EMD) страдает от смешивания мод и краевых эффектов при сильном шуме, а полносвязные автоэнкодеры для восстановления температуры игнорируют локальные временные корреляции. Эти ограничения приводят к ненадёжной диагностике в реальных условиях эксплуатации фитинговой платформы. Поэтому гибридная структура, объединяющая взаимодополняющие вибрационные и температурные признаки, необходима для устойчивого раннего обнаружения неисправностей [2]. Раннее обнаружение неисправностей подвижного состава, в свою очередь, позволяет не только существенно повысить безопасность перевозочного процесса, но и научно обоснованно использовать более экономически эффективные модели его эксплуатации с дифференцированными циклами контроля состояния, технического обслуживания и ремонта вагонов в зависимости от фактических параметров износа и наличия дефектов, а не в соответствии с едиными плановыми межремонтными периодами.

Предлагаемый метод объединяет три взаимодополняющие методики в единую диагностическую структуру.

1 Извлечение вибрационных признаков с помощью CEEMDAN.

Для подавления проблемы смешивания мод, присущей традиционному EMD [3], применяется полная ансамблевая эмпирическая модовая декомпозиция с адаптивным шумом (CEEMDAN). Она раскладывает исходные вибрационные сигналы в ряд функций собственных мод (IMF). Эффективные IMF отбираются по коэффициентам корреляции с исходным сигналом, а из восстановленного сигнала извлекаются 18 признаков во временно́й и частотной областях, всесторонне отражающих информацию, связанную с неисправностью.

2 Извлечение температурных признаков с помощью свёрточного автоэнкодера (CAE).

Одномерный CAE обучается исключительно на температурных данных нормального состояния. Кодер сжимает входную последовательность в скрытое представление, а декодер пытается восстановить её. Поскольку сеть обучается только на здоровых тепловых закономерностях, неисправные входные данные дают значительно большую ошибку восстановления. Ошибка восстановления служит чувствительным индикатором аномалии и объединяется со скрытыми признаками, образуя вектор температурных признаков.

3 Объединение признаков и ансамблевая классификация

Наборы вибрационных и температурных признаков объединяются, а для адаптивного снижения размерности используется стековый автоэнкодер (SAE), чтобы устранить избыточность, сохранив дискриминативную информацию. Полученный компактный вектор признаков подаётся в классификатор XGBoost [4], который строит ансамбль решающих деревьев с регуляризацией для достижения хорошей обобщающей способности даже при умеренных объёмах выборки.

Экспериментальная проверка

Эксперименты проводились на стенде для испытаний подшипников в Университете Падерборна. Объектом испытаний был радиальный однорядный шарикоподшипник 6203 с глубоким желобом, вибрационные сигналы регистрировались с частотой дискретизации 64 кГц. Для оценки устойчивости диагностики были сформированы два набора данных при различных режимах работы:

– набор A: частота вращения 1500 об/мин, крутящий момент нагрузки 0,7 Н·м, радиальная сила 1000 Н;

– набор B: частота вращения 900 об/мин, крутящий момент нагрузки 0,7 Н·м, радиальная сила 1000 Н.

Каждый набор охватывает четыре состояния подшипника: исправное, дефект внутреннего кольца, дефект наружного кольца и комбинированный дефект.

В таблице 1 сравнивается средняя точность диагностики четырёх методов. Экспериментальные данные показывают, что предлагаемая структура CEEMDAN–CAE–XGBoost стабильно превосходит все базовые методы.

Таблица 1 – **Средняя точность диагностики различных методов**

В процентах

Метод	Набор A	Набор B
Только температура	82,3	80,7
Только вибрация	87,6	85,2
PCA + BP	91,4	89,8
Предлагаемый	98,9	98,1

Предлагаемый метод достигает средней точности выше 98,5 % на обоих наборах данных, значительно превосходя методы на основе одного источника и традиционные подходы к объединению на основе PCA.

Выводы

В данной работе предлагается гибридная диагностическая структура для подшипников буксовых узлов на железнодорожных фитинговых платформах, объединяющая вибрационную декомпозицию на основе CEEMDAN, восстановление температуры на основе CAE и ансамблевое обучение XGBoost. Результаты экспериментов демонстрируют три ключевых преимущества:

– CEEMDAN эффективно подавляет смешивание мод, формируя IMF с более ясным физическим смыслом;

– CAE использует локальные временные корреляции, обеспечивая более чувствительные индикаторы тепловых аномалий;

– XGBoost с регуляризацией обеспечивает более сильную обобщающую способность, чем традиционные сети с обратным распространением (BP).

Метод достигает точности свыше 98,5 % в изменяющихся условиях работы, обеспечивая надёжное и практичное решение для ранней диагностики слабых неисправностей в сложных условиях эксплуатации фитинговых платформ и может быть применим для ранней диагностики неисправностей подшипников в буксовых узлах и других родов железнодорожного подвижного состава. Выявление неисправности на стадии появления первых признаков позволяет исключить ее развитие до состояния отказа, угрожающего безопасности движения поездов.

Особым достоинством метода является то, что его применение не требует дополнительного диагностического оборудования по сравнению с используемыми в настоящее время методами, а точность диагностики и более раннее выявление неисправностей достигаются за счет применения более эффективной модели обработки температурных и вибрационных сигналов, получаемых от имеющихся датчиков.

Список литературы

1 A survey on fault diagnosis algorithms for high-speed train bearings / M. Yang, T. Zhang, H. Yang [et al.] // Computing. – 2025. – № 107 (9). – Article 175.

2 Axle bearing fault diagnosis for high-speed trains: a comprehensive review of methodologies, technologies, challenges and emerging trends / M. Abtane, K. Dahi, H. Martinez [et al.] // Measurement. – 2025. – № 251. – Article 117098.

3 **Randall, R. B.** Why EMD and similar decompositions are of little benefit for bearing diagnostics / R. B. Randall, J. Antoni // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2023. – № 192. – Article 110207.

4 **Chen, T.** XGBoost: A scalable tree boosting system / T. Chen, C. Guestrin // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2016. – P. 785–794.

УДК 614.841:629.45

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МЕЖВАГОННОГО ПЕРЕХОДА СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ

С. Н. ШАТИЛО

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В настоящее время в Республике Беларусь значительно выросли пассажирские перевозки, осуществляемые современным подвижным составом. При этом особое внимание уделяется повышению комфортности таких перевозок, качеству обслуживания пассажиров и обеспечению их безопасности. Обеспечение пожарной безопасности моторвагонного подвижного состава является одной из приоритетных задач на Белорусской железной дороге. Накоплен большой опыт в обеспечении пожарной безопасности железнодорожного подвижного состава, совершенствуется система противопожарной защиты, однако появляются проблемы, которые связаны с созданием нового подвижного состава отличающегося по конструктивному исполнению. Современные электропоезда для магистральных железных дорог и метрополитена по конструктивному исполнению отличаются от классической схемы, т. к. они не разделяются на вагоны с помощью специальных конструктивных элементов – торцовых стен, которые предназначены для препятствия распространению пожара по длине электропоезда. Вместе с тем уровень обеспечения пожарной безопасности в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 должен быть не более 10^{-6} воздействия опасных факторов пожара в год.

Требования пожарной безопасности для моторвагонного подвижного состава определены ГОСТ 34394-2018. Эти требования включают классификацию тягового подвижного состава по функциональной пожарной опасности, которая применяется для определения требований в зависимости от условий эксплуатации и последствий возможных пожаров. В частности, определены следующие требования: к материалам, конструкциям и противопожарным преградам с показателями

пожарной опасности и пределами огнестойкости; к силовым установкам, электрооборудованию, проводам и кабелям; к системам отопления, вентиляции и кондиционирования; к автоматическим системам и установкам пожарной сигнализации и пожаротушения; к обеспечению безопасных условий эвакуации людей при пожаре. Данные требования должны быть выполнены уже на стадии проектирования и при ремонте подвижного состава.

Характерной особенностью пожаров в замкнутых объемах, в том числе и железнодорожном подвижном составе, является их распространение. При этом возможны два вида распространения: линейное и объемное. При линейном распространении пожара пламя перемещается по поверхности горючих материалов в определенном направлении в данной плоскости, например, по поверхности внутренней облицовки подвижного состава по потолку, стенам и полу. При линейном распространении постоянно изменяется площадь поверхности горения, т. е. площадь пожара. В этом случае горение сопровождается выделением значительного количества тепловой энергии, которая может передаваться как контактирующим с очагом горения поверхностям, так и поверхностям расположенным на определенном расстоянии. Это происходит из-за того, что эти поверхности нагреваются до температуры самовоспламенения или воспламенения при контакте с открытым пламенем. Применительно к электроподвижному составу пожар может распространяться по сгораемой внутренней облицовке пассажирских салонов, т. е. по сгораемым отделочным и облицовочным материалам, а также конструктивным элементам вагонов. При объемном распространении пожара имеет место возникновение новых очагов возгорания на определенном расстоянии от первоначального очага и в других плоскостях. Это возможно как в пределах одного вагона, так и переходом пожара из одного вагона в другой. В этом случае основной причиной такого распространения является передача тепловой энергии излучением, конвекцией и теплопроводностью. По мере увеличения площади и объема зоны горения объект заполняется продуктами горения, которые имеют высокую температуру и в процессе перемещения излучают теплоту, отдают ее окружающим предметам, конструкциям и оборудованию. Источником излучения тепловой энергии является также и само пламя. При этом продукты горения и лучистая энергия вызывают новые очаги пожара в пределах замкнутого объема. На развитие и распространение пожара в пассажирских салонах электропоездов в этом случае существенное влияние оказывает взаимный обогрев различных элементов конструкций подвижного состава. Такое развитие пожаров характерно в целом для пассажирского подвижного состава. Это учитывается при разработке объемно-планировочных и конструктивных решений по обеспечению пожарной безопасности. В частности, в классической повагонной схеме компановки применяются противопожарные преграды в виде перегородок, торцовых стен в вагонах, что позволяет разделять весь объем на пожарные секции. Это является ключевым при выборе объемно-планировочных решений. Современные же электропоезда представляют собой открытую планировку без конструктивного разделения всего внутреннего объема. Для обеспечения пожарной безопасности в данном случае регламентируется требование к отделочным, облицовочным материалам и покрытию пола, которые должны быть по показателям горючести, воспламеняемости, дымообразующей способности, токсичности продуктов горения и распространению пламени по поверхности не опаснее: для стен и потолка Г1, В2, Д2, Т2 и РП1; для покрытия пола Г2, В2, Д3, Т2 и РП2. Такое решение позволяет ограничить линейное распространение пожара по внутреннему объему электропоезда. Действующими нормами регламентируется также требование к переходным мостикам между вагонами электропоезда и в целом межвагонному переходу. Так, предел огнестойкости переходных мостиков должен быть не менее R15. При оценке соответствия элементов межвагонного перехода требованиям пожарной безопасности необходимо учитывать, что элементы такого перехода (переходные мостики, гибкое сочленение, подкладная плита и планка) в данном случае практически находятся в пассажирском салоне и могут принимать участие в линейном и объемном распространении пожара. Поэтому к данным конструктивным элементам должны предъявляться такие же требования по конструктивному исполнению и по показателям пожарной опасности, как и для стен, потолка и пола вагонов, что позволяет ограничить интенсивность распространения пожара внутри салона по этим элементам.

Для оценки пожарной безопасности межвагонного перехода современного электропоезда были проведены специальные огневые испытания с использованием стандартной кривой нарастания температуры при пожаре. При этом пределы огнестойкости определялись по времени от начала теплового воздействия на конструкцию до наступления одного или последовательно нескольких пре-

дельных состояний по огнестойкости с учетом функционального назначения конструкций. При проведении испытания на огнестойкость переходной площадки межвагонного перехода по предельным состояниям по критериям E (потеря целостности), I (потеря теплоизолирующей способности вследствие повышения температуры на необогреваемой поверхности конструкции до предельных значений). В данном случае принимается условие, по которому при потере конструкцией целостности (показатель E) происходит потеря ее несущей способности (показатель R). Целостность в процессе испытания определялась по наличию трещин или отверстий, размер которых превышает предельные значения по стандартной методике, а также образование устойчивого горения на стороне конструкции, не подверженной воздействию огня. При определении процедуры и методики испытания учтено то, что переход между вагонами защищает внутреннюю зону от воздействия внешней среды, поэтому конструкция межвагонного перехода и пола должны выполнять функцию в том числе и противопожарной преграды. При этом система перехода должна считаться элементом конструкции корпуса электропоезда, а также необходимо принять во внимание потенциальные источники огня, которые могут воздействовать на конструкцию перехода. Таким источником является расположенный под полом технический шкаф, содержащий источник электропитания высокого напряжения и электрические цепи тяговой системы электропоезда. Критическими зонами конструкции межвагонного перехода (нижней ее части) являются угловые секции перехода, в которых располагаются места соединений (соединительные швы) и конструктивные угловые элементы. Для получения достоверных данных, характеризующих показатели пожарной опасности межвагонного перехода, была выбрана нижняя его часть, которая определяет критическую зону воздействия огня. Анализ результатов испытаний проводился по типовой стандартной методике, которая устанавливает общие принципы для определения сопротивления различных элементов конструкций при стандартных условиях воздействия огня по кривой «температура – время». В процессе испытания проведена проверка на устойчивость к потере несущей способности и целостности испытываемой конструкции, а также термоизоляции внутреннего пространства под воздействием внешнего источника огня, когда он действует на нижнюю часть перехода. Контрольные измерения температуры в процессе испытаний проводились равномерно по всей поверхности испытательной конструкции, а также измерялись показатели температуры на необогреваемой поверхности. Анализ данных показывает, что по истечении 20 минут испытания зафиксированные показатели не превысили нормативных значений, поэтому фактический предел огнестойкости данной конструкции составляет EI 15 и R 15 и соответствует нормативным требованиям.

УДК 629.3.017.2

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ГРУЗА

А. О. ШИМАНОВСКИЙ, И. Е. КРАКОВА, О. И. ЦЫГАНОК
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Для обеспечения безопасности транспортировки крупногабаритных грузов автотранспортом следует строго выдерживать скоростной режим при движении по повороту, что связано с возникновением центробежных сил, которые приводят к возникновению опрокидывающего момента. Однако в случае, если крупногабаритные грузы обладают значительной массой, близкой к грузоподъемности транспортного средства, при смещении центра тяжести груза относительно продольной вертикальной плоскости автомобиля нагрузки на шины, расположенные слева и справа по ходу движения, оказываются разными даже при прямолинейном движении. Такая ситуация вследствие деформации шин ведет, в свою очередь, к повороту кузова, вследствие которого вероятность опрокидывания при движении по повороту может значительно увеличиваться.

Расчет допускаемой скорости движения по повороту обычно выполняют, полагая, что транспортное средство не поворачивается в поперечной плоскости. В работах [1, 2] рассмотрены динамические модели автомобилей, учитывающие уклон поверхности дороги и деформации рессор. Получены зависимости коэффициентов устойчивости автомобиля от смещения центра масс груза от

продольной вертикальной плоскости. В исследовании, представленном в работе [3], показано, что даже незначительные вертикальные (до 4 см) и боковые (до 2 см) смещения крупногабаритного тяжеловесного груза на платформе приводят к существенному ухудшению угловой устойчивости полуприцепа-тяжеловоза, повышая риск возникновения аварийной ситуации на виражах. Выполненный анализ [4] показывает, что расчеты устойчивости автотранспортных средств при движении по повороту не учитывают, как правило, деформации шин, которые могут оказаться существенными при транспортировке тяжеловесных грузов.

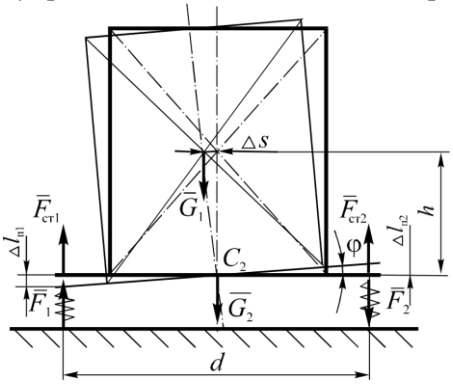


Рисунок 1 – Схема поворота автоплатформы при смещении тяжеловесного груза

Целью данной работы стало определение влияние смещения центра масс груза в поперечной плоскости на склонность транспортного средства к опрокидыванию при учете деформирования шин.

Для анализа устойчивости транспортного средства, перевозящего крупногабаритный тяжеловесный груз, была разработана схема грузовой платформы, на которой установлен груз (рисунок 1). При составлении расчетной схемы учитывались: силы упругости, соответствующие статической деформации упругих элементов подвески и шин при расположении центра тяжести в продольной плоскости симметрии платформы ($F_{ст1}$ и $F_{ст2}$), а также силы упругости, обусловленные поворотом автоплатформы (F_1 и F_2). Подвеска полуприцепа моделировалась системой пружин с коэффициентом жесткости $c_{экв}$, с учетом того, что при поперечном смещении груза происходит поворот кузова автоплатформы относительно продольной центральной оси и деформации подвески слева и справа различаются.

В ходе работы была получена нелинейная зависимость угла поворота φ автоплатформы от смещения центра тяжести груза в поперечном направлении Δs, позволившая также учесть дополнительный момент опрокидывания, связанный с поворотом груза вокруг горизонтальной оси, который обусловлен высоким расположением его центра тяжести.

Смещение крупногабаритного груза в горизонтальной плоскости опасно тем, что при таком смещении происходит перераспределение сил, действующих на колеса. Выполнен анализ движения по закругленному участку дороги системы, включающей полуприцеп массой 18 т и крупногабаритный груз массой 100 т. Установлено, что при превышении величины статической деформации подвески $l_{ст}$ крайний правый блок колес отрывается от поверхности земли (рисунок 2), что приводит к дальнейшему опрокидыванию транспортного средства вследствие снижения жесткости подвески при повороте рамы полуприцепа. Также осуществлено моделирование движения груза с полуприцепом в среде пакета MSC.ADAMS (рисунок 3).

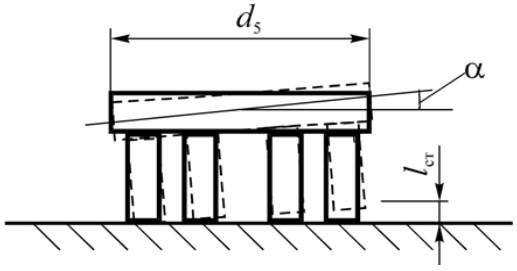


Рисунок 2 – Схема к определению угла отрыва колес от поверхности земли

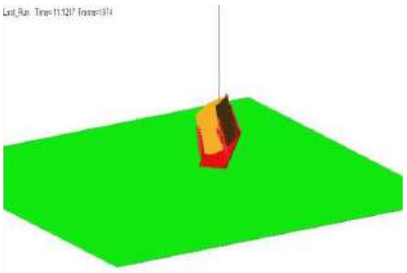


Рисунок 3 – Результаты моделирования движения груза вместе с полуприцепом

Выполнены расчеты соответствующего началу опрокидывания смещения центра масс груза от продольной вертикальной плоскости симметрии транспортного средства для разных значений статической деформации подвески, значения которой изменялись в диапазоне от 0,0305 м (деформируются только шины) до 0,122 м. Анализ полученных результатов показал, что малым значениям статической деформации соответствуют большие значения перемещения груза при начале опрокидывания. Также расчеты показали, что при отсутствии у полуприцепа рессор и учете только деформирования шин для опрокидывания полуприцепа достаточно поперечного смещения трансформато-

ра на 41 см. Учет наличия рессор приводит к уменьшению этого расстояния, и при статической деформации подвески 0,13 м такое смещение уменьшается до 25 см. Его реально можно достичь в тех случаях, при которых центр масс груза не совпадает с его геометрическим центром.

Также получена зависимость коэффициента трения, необходимого для удержания груза от скольжения в зависимости от угла наклона платформы.

Таким образом, при анализе устойчивости движения при транспортировке тяжеловесных грузов следует учитывать деформации как подвески, так и шин. При наличии смещения центра масс груза от продольной вертикальной плоскости транспортного средства их высокая деформируемость может стать важным дополнительным фактором, определяющим безопасность движения.

Список литературы

1 Влияние расположения груза в кузове грузового автомобиля на устойчивость автомобиля в поворотах / Ю. Л. Власов, Н. А. Морозов, И. А. Бочаров, А. А. Гаврилов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – № 4. – С. 165–171.

2 **Тинт, Н. В.** Исследование влияния крена кузова на поперечную устойчивость грузового фургона при повороте / Н. В. Тинт, В. М. Алакин // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2022. – № 3. – С. 106–113.

3 Stability of heavy articulated vehicles: Effect of load distribution / G. Moreno, V. Manenti, G. Guerero [et al.] // Transportation Research Procedia. – 2018. – Vol. 33. – P. 211–218.

4 **Шимановский, А. О.** Обзор исследований динамики автоцистерн / А. О. Шимановский // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 11. – С. 23–28.

УДК 669.13:620.178.16

ВЛИЯНИЕ АУСТЕНИТНО-БЕЙНИТНОЙ СТРУКТУРЫ НА ТРИБОФАТИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

С. С. ЩЕРБАКОВ
Национальная академия наук Беларуси, г. Минск

В. В. КОМИССАРОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Н. К. ТУРСУНОВ
Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

Повышение долговечности деталей, работающих при совместном действии трения и циклических нагрузок, определяется не только уровнем прочности материала, но и его структурной способностью сопротивляться локальному контактному повреждению. Для высокопрочного чугуна с шаровидным графитом перспективным является формирование аустенитно-бейнитной (аусферритной) матрицы посредством изотермической закалки. Цель работы – проанализировать взаимосвязь режимов аустемперинга, параметров структуры и трибофатической стойкости специальных ВЧШГ.

Технологический цикл включал получение базового ВЧШГ, механическую обработку в мягком литом состоянии при твёрдости 240–280 HBW и последующий аустемперинг. Изотермическую выдержку проводили при 330–370 °С в течение 90–180 мин. В результате формировалась матрица из тонких игольчатых пластин феррита и высокоуглеродистого остаточного аустенита; содержание последнего составляло 25–40 %, а толщина ферритных пластин – 0,1–0,5 мкм.

По экспериментальным данным двухстадийная обработка, включающая аустенитизацию при 880–890 °С с выдержкой 30–60 мин и изотермическую закалку при 270–350 °С, позволяет целенаправленно изменять соотношение прочности и пластичности. Для чугуна ВЧТГ-100-2-М2 при выдержке 270 °С получено среднее временное сопротивление 1391 МПа при твёрдости 46,6 HRC; при 300 °С временное сопротивление составило 1306 МПа, а относительное удлинение увеличилось с 1,7 до 2,0 % (рисунок 1).

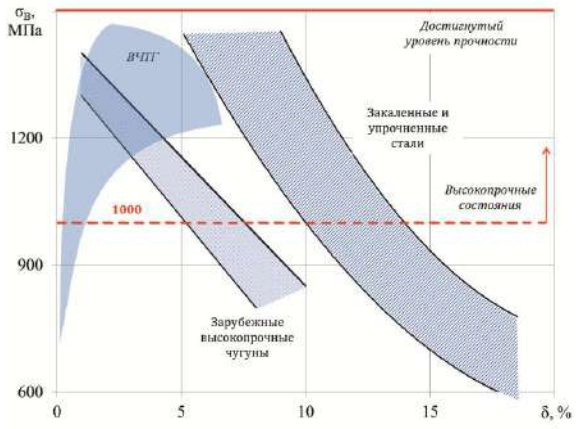


Рисунок 1 – Соотношение временного сопротивления и относительного удлинения для ВЧТГ, зарубежных высокопрочных чугунов и упрочнённых сталей

На рисунке 1 сопоставлены механические свойства при растяжении высокопрочных чугунов и сталей. Как видно, в определённом состоянии свойства исследуемого высокопрочного чугуна превосходят мировые достижения в области высокопрочных чугунов [1].

Формирование аусферритной структуры принципиально изменяет поведение материала при контактно-циклическом нагружении. Остаточный аустенит представляет собой структурный резерв для деформационно-индуцированного превращения: в зоне трения и максимальных контактных напряжений часть метастабильного аустенита превращается в мартенсит. TRIP-эффект приводит к локальному упрочнению поверхностного слоя непосредственно в процессе эксплуатации, поэтому трибофатическую стойкость нельзя оценивать только по исходной объёмной твёрдости.

Для бейнитного чугуна с шаровидным графитом контактная выносливость составляет 32–36 Н/мм². В исходном материале также показано, что пара трения «бейнитный чугун – сталь 20Х» характеризуется более высокой антизадирной стойкостью по сравнению с парой закалённых сталей «15Х–20Х» (рисунок 2). Такая закономерность согласуется с представлением о деформационном упрочнении аусферритной матрицы при трибологическом воздействии.

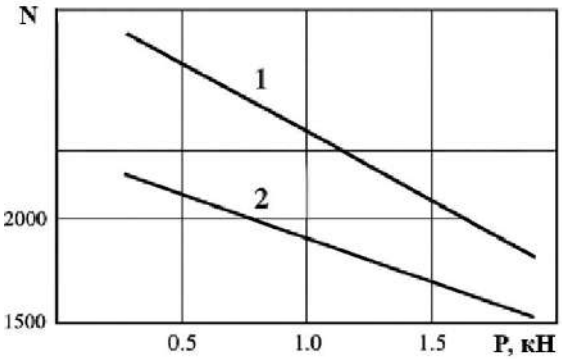


Рисунок 2 – Антизадирные свойства пар трения:
1 – БЧШГ– сталь 20Х; *2* – сталь 15Х– сталь 20Х

Наиболее выраженное деформационное упрочнение ожидается при наличии достаточного количества метастабильного остаточного аустенита, способного к превращению под нагрузкой. Поэтому выбор температуры и продолжительности аустемперинга должен обеспечивать не максимизацию отдельного показателя, а требуемый баланс прочности, пластичности и структурной устойчивости применительно к условиям работы детали.

Таким образом, установлена последовательная взаимосвязь «режим аустемперинга → аусферритная структура → состояние остаточного аустенита → деформационное упрочнение → трибофатическая стойкость». Управление структурой посредством параметров изотермической обработки является перспективным технологическим инструментом повышения долговечности специальных ВЧШГ. Для ответственных транспортных деталей необходимы контроль однородности структуры по сечению отливки и подтверждение полученных закономерностей в условиях, максимально приближенных к эксплуатационному нагружению.

Список литературы

1 **Псырков, Н. В.** Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как новый конструкционный материал / Н. В. Псырков // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 3–4 (20–21). – С. 213–218.

УДК 669.13:620.178.16

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ И УСТАЛОСТНЫХ СВОЙСТВ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЧУГУНОВ С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ ДЛЯ ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С. С. ЩЕРБАКОВ
Национальная академия наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь
В. В. КОМИССАРОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель
Н. К. ТУРСУНОВ
Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

Одновременное действие контактных напряжений, трения и циклических нагрузок формирует особый механизм повреждения деталей транспортных машин, который не может быть достаточно полно описан раздельной оценкой износостойкости и усталостной прочности. В связи с этим актуальна комплексная оценка материалов в рамках трибофатического подхода. Цель работы – сопоставить структурно-механические, контактно-усталостные и трибологические характеристики специальных высокопрочных чугунов с шаровидным графитом (ВЧШГ), включая аустенитно-бейнитные разновидности и сплав MONICA, с характеристиками традиционных сталей.

Исходный ВЧШГ характеризовался количеством глобулей графита более 100 мм$^{-2}$ и нодулярностью свыше 85 %. Для получения специальных составов применяли легирование Mo–Ni–Cu: 0,20–0,28 % Mo, 0,8–1,4 % Ni и 0,7–1,0 % Cu. Аустемперинг проводили при 330–370 °C в течение 90–180 мин. Формировалась аусферритная матрица с 25–40 % остаточного высокоуглеродистого аустенита и игольчатыми пластинами феррита толщиной 0,1–0,5 мкм.

Испытания выполняли в соответствии с методологией ГОСТ 30638-99 [1], ГОСТ 30754-2001 [2] и ГОСТ 30755-2001. Контактно-механическую усталость исследовали при качении цилиндрических образцов с одновременным действием нормальной и касательной составляющих нагрузки; усталостные характеристики при изгибе с вращением определяли на базе до 10^8 циклов. Полученный диапазон механических свойств приведён в таблице 1.

Таблица 1 – **Механические свойства специальных высокопрочных ВЧШГ**

Показатель	Диапазон значений
Временное сопротивление, МПа	900–1600
Предел текучести, МПа	650–1300
Относительное удлинение, %	1–9
Твёрдость, HBW	270–510
Ударная вязкость, Дж	10–80
KIC, МПа·м	35–75
Остаточный аустенит, %	25–40
Модуль упругости, ГПа	165–170

Сопоставление показало, что для трибогенного чугуна ВЧТГ предел выносливости при контактном нагружении составляет 900–1050 МПа, а при изгибе – 270–310 МПа. Для сплава MONICA получены соответственно 975 и 290 МПа. Для легированной термоупрочнённой стали 18ХГТ эти значения составляют 915 и 337 МПа, а для обычного чугуна с шаровидным графитом – 625 и 229 МПа (рисунок 1). Следовательно, специальные ВЧШГ по сопротивлению контактной усталости достигают уровня термоупрочнённых сталей, сохраняя характерные для литейных сплавов технологические преимущества.

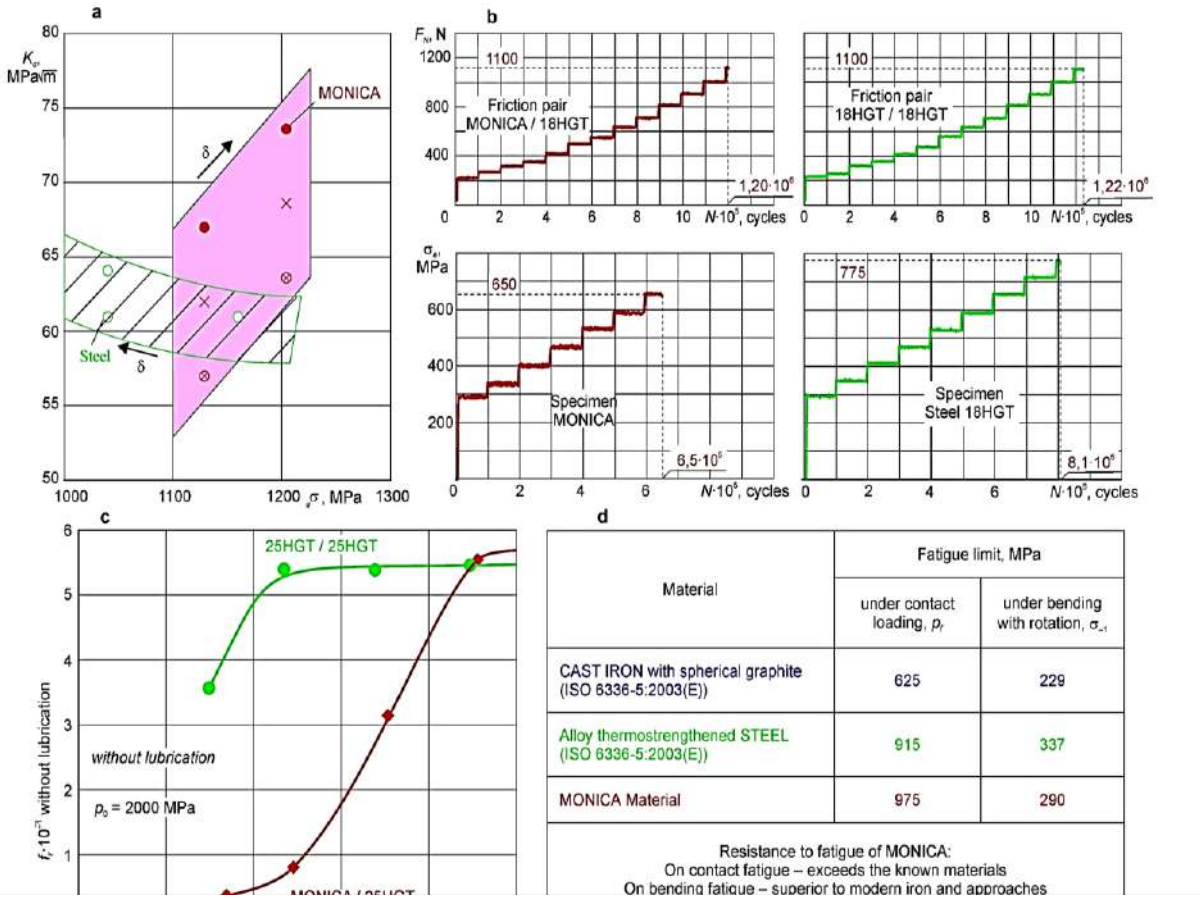


Рисунок 1 – Сравнительные характеристики сплава MONICA и стали 18ХГТ [3, 4]

Отношение предела выносливости к временному сопротивлению для исследованных составов находится в пределах 0,38–0,45, тогда как для обычного ВЧШГ оно составляет 0,30–0,35. Существенную роль в формировании эксплуатационных свойств играет деформационно-индуцированное превращение остаточного аустенита в мартенсит при трибологическом нагружении. Возникающее локальное упрочнение поверхностного слоя повышает сопротивление изнашиванию и контактно-усталостному повреждению.

Таким образом, специальные ВЧШГ с аусферритной матрицей обладают сочетанием высокой прочности, контактной выносливости и способности к деформационному упрочнению. Полученные результаты обосновывают перспективность их дальнейшего исследования для транспортных трибофатических систем. Применение в ответственных железнодорожных узлах должно сопровождаться подтверждением стабильности свойств крупных отливок, контролем качества и эксплуатационными испытаниями применительно к конкретным схемам нагружения.

Список литературы

1 Трибофатика. Термины и определения : межгос. стандарт : ГОСТ 30638–99. – Введ. 2000-01-01. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1999. – 17 с.

2 Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость : межгос. стандарт : ГОСТ 30754–2001. – Введ. 2002–07–01. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. – 32 с.

3 Чугун и сталь в трибофатических системах современных машин и оборудования / Л. А. Сосновский, П. А. Витязь, В. А. Гапанович [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 4 (29). – С. 5–20.

4 **Сосновский, Л. А.** О выборе современного конструкционного металлического материала для механических систем ответственного назначения. Ч. 2 / Л. А. Сосновский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2022. – № 4 (61). – С. 86–96. – DOI: 10.46864/1995-0470-2022-4-61-86-96.

3 ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ

УДК 004.056

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВХОДНОГО ВЕКТОРА ЗНАЧИМЫХ ПРИЗНАКОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ ПОДМЕНЫ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЕ

Н. С. АФАНАСЬЕВА, Д. А. ЕЛИЗАРОВ
Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация

К. О. ГНИДКО
Научно-технологический университет «Сириус», г. Сочи, Российская Федерация

Автоматизированное средство подмены пользователя (веб-бот) – виртуальный агент, имитирующий действия человека через пользовательские интерфейсы путем автоматического выполнения заранее заданных операций. Веб-боты широко применяются для автоматизации задач по индексированию, обновлению и обслуживанию веб-контента. Вместе с тем наблюдается рост использования ботов в противоправных целях, включая организацию DDoS-атак, несанкционированный сбор и неправомерное использование конфиденциальных данных или получение неправомерного преимущества в бизнесе [1].

Вредоносные боты (Bad bot, злонамеренные боты, malicious bot) представляют собой автономные интеллектуальные продукты, разработанные с целью мошенничества, причинения вреда конечным пользователям или организациям в целом [2].

Эффективность системы обнаружения ботов во многом зависит от качества представления входных данных. На этапе предобработки данных необходимо выполнить этап извлечения информативной информации, которая позволит модели определить наличие признаков автоматизации. Такая информация представляется в виде набора характеристик, называемого входным вектором признаков.

При построении математической модели входного вектора используется блочный принцип. Модель строится из отдельных логически законченных блоков, отражающих ту или иную сторону рассматриваемого процесса. Блочный принцип построения модели позволит решить проблему масштабирования процессов:

$$X = \{f_1, f_2, f_3,\}.$$

В итоге математическая модель входного вектора для детектирования ботов представляет собой формализованное представление сессии пользователя (или запроса) в виде набора количественных признаков. Для каждого сеанса взаимодействия строится входной вектор X, который объединяет три набора количественных признаков: сессионные метрики, характеристики окружения/отпечатков системы и паттерны пользовательской активности.

К сессионным характеристикам необходимо включить количество запросов в сессии, длительность сессии, среднее время между запросами. К сетевым признакам – наличие/отсутствие заголовков, параметры User-Agent, IP-репутация.

Ключевым инструментом по выявлению автоматизированных средств подмены пользователя является поведенческий анализ, в частности анализ динамических характеристик движения мыши. Существующие подходы к формированию пространства признаков в данной области имеют ряд существенных ограничений: использование только классических кинематических параметров (скорость, ускорение, кривизна, рывок и т. д.) – не позволяет полноценно описать вариативную природу человеческой моторики [3]; частичное использование особенностей, возникающих в связи с фрак-

тальной природой и долгосрочной корреляцией [4], присущих траекториям движений реального пользователя и отсутствующим в сгенерированных. Расчет характеристических признаков происходит для каждого трека в отдельности. Пример трека мыши представлен на рисунке 1. Трек представляет совокупность событий мыши, каждое из которых содержит свою позицию на экране, в общем виде трек можно описать как последовательность событий, состоящей из n точек:

$$\{P_1, P_2, P_3, \ldots, P_n\}.$$

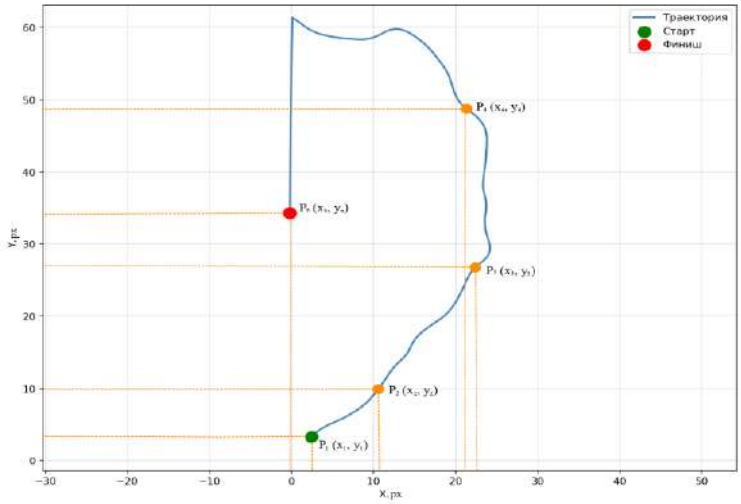


Рисунок 1 – Пример трека мыши

В результате анализа [5–7] систематизированы базовые признаки, состоящие из 56 параметров. Предложен набор новых дополнительных 166 признаков, расширяющий базовое пространство за счет использования порядковых статистик, сравнений распределений параметров с эталонными, параметра хи-квадрат, угловых распределений и энтропийных коэффициентов, позволяющий улавливать различия в поведении реальных пользователей и ботов, тем самым повышая потенциальную точность детектирования последних.

В итоге сформирован расширенный набор признаков, описывающий траекторию движения компьютерной мыши как устойчивый биометрический образ, необходимый для высокоточного выявления автоматизированных средств подмены пользователей. В последствии данный набор признаков будет применяться в алгоритмах машинного обучения (классификации и кластеризации данных). Это позволит обнаруживать ботов с более высокой точностью, снижая ложные срабатывания и обеспечивая адаптивное детектирование аномалий в режиме реального времени без привлечения дополнительных аппаратных средств.

Список литературы

1 **Афанасьева, Н. С.** Вредоносные боты в современном мире. Анализ, последствия и возможные способы борьбы с ними / Н. С. Афанасьева, Д. А. Елизаров, П. С. Ложников // Информационная безопасность цифровой экономики : материалы XIX науч.-практ. конф., Улан-Удэ, 7–11 июня 2023 г. – Новосибирск : Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2023. – С. 84–92.

2 2025-Bad-Bot-Report. – URL: https://www.imperva.com/resources/wp-content/uploads/sites/6/reports/2025-Bad-Bot-Report.pdf (date of access: 11.09.2026).

3 **Stergiou, N.** Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: is there a connection? / N. Stergiou, L. M. Decker // Human Movement Science. – 2011. – Vol. 30, № 5. – P. 869–888. – DOI: https://doi.org/10.1016/ j.humov.2011.06.002.

4 **Santuz, A.** Fractal analysis of muscle activity patterns during locomotion: pitfalls and how to avoid them / A. Santuz, T. Akay // Journal of Neurophysiology. – 2020. – Vol. 124, № 4. – P. 1083–1091. – DOI: https://doi.org/10.1152/jn.00360.2020.

5 **Chuda, D.** Usage of computer mouse characteristics for identification in web browsing / D. Chuda, P. Kratky // Proceedings of the 15th International Conference on Computer Systems and Technologies (CompSysTech'14). – New York : ACM, 2014. – P. 218–225. – DOI: https://doi.org/10.1145/2659532.2659625.

6 User identity verification via mouse dynamics / C. Feher, Y. Elovici, R. Moskovitch [et al.] // Information Sciences. – 2012. – Vol. 201. – P. 19–36. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ins.2012.02.023.

7 **Gamboa, H.** A behavioral biometric system based on human-computer interaction / H. Gamboa, A. Fred // In: Proceedings of SPIE. – Vol. 5404, Biometric Technology for Human Identification. – 2004. – P. 381–392. – DOI: https://doi.org/10.1117/12.541443.

УДК 656.259.12

ВЛИЯНИЕ РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ АППАРАТУРЫ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТОНАЛЬНОЙ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ

К. А. БОЧКОВ, Д. Д. МЕДВЕДЕВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Регулировка тональных рельсовых цепей (ТРЦ) выполняется по таблицам, рассчитанным для номинальных параметров аппаратуры и рельсовой линии [1]. Реальная аппаратура всегда будет отличаться от номинала, потому что емкость конденсаторов имеет допуск, переходные сопротивления контактов и монтажа меняются от сборки к сборке, входное сопротивление путевых приемников имеет значительный разброс [2], а коэффициенты четырехполюсника путевого фильтра зависят от уровня сигнала [3]. Сопротивление рельсов, в свою очередь, меняется с температурой и состоянием стыков. Регулировочная таблица этих отклонений не учитывает, поэтому фактический запас по напряжению на путевом приемнике в нормальном режиме и его превышение в шунтовом режиме остаются неизвестными. Следовательно, необходимо количественно оценить эти откло-нения и выделить параметры, которые определяют их в наибольшей степени.

Был выполнен расчет ТРЦ с питанием из середины (несущая частота 480 Гц) по цифровой модели [4]. Сначала напряжение генератора выбиралось так, чтобы при номинальных параметрах и минимальном сопротивлении изоляции 0,415 Ом·км меньшее из напряжений на двух приемниках составляло 0,42 В, т. е. на 5 % превышало норму 0,40 В. Затем при зафиксированном напряжении генератора выполнено 4000 расчетов со случайными параметрами, равномерно распределенными в следующих пределах: емкость конденсаторов фильтра ±5 %; добавочное сопротивление монтажа и контактов фильтра от 1,5 до 3 Ом (на макете в двух сборках получено 1,9 и 2,5 Ом); входное сопротивление приемника ±20 %; сопротивление рельсов ±10 %; напряжение генератора ±5 %. Для каждой реализации рассчитывались напряжение на приемнике в нормальном режиме при сопротивлении изоляции 0,415 Ом·км и наибольшее напряжение генератора. В шунтовом режиме – при сопротивлении изоляции 50 Ом·км, повышенном напряжении генератора в 1,25 раза и шунте 0,06 Ом, наложенном в начале, середине и конце каждой рельсовой линии.

Результаты приведены на рисунке 1. В нормальном режиме напряжение на приемнике изменяется от 0,25 до 0,61 В (90 % реализаций – от 0,31 до 0,50 В) и у 51 % реализаций оно ниже нормы 0,40 В, а у 20 % – ниже 0,35 В. Таким образом, запас 5 %, заложенный в табличную регулировку, разброс параметров аппаратуры не покрывает. Напряжение в шунтовом режиме превышает номинальное расчетное значение более чем на 10 % в 13 % реализаций, более чем на 20 % – в 3,3 %, наибольшее превышение составляет 1,41 раза.

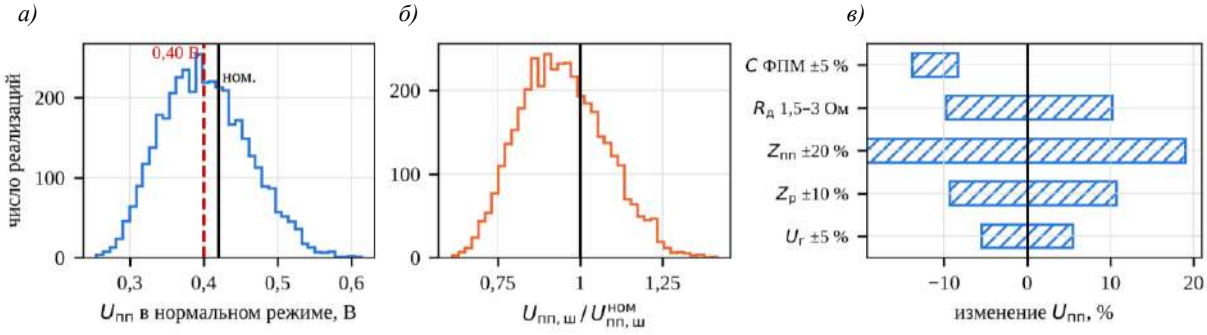


Рисунок 1 – Распределение напряжения на приемнике в нормальном (*а*) и шунтовом (*б*) режимах и влияние отдельных параметров (*в*)

Наибольшее влияние оказывает входное сопротивление приемника. При его отклонении на ±20 % изменяется напряжение на приемнике на ±19 %. Сопротивление рельсов и добавочное сопротивление монтажа дают изменения около ±10 % каждое. Отклонение емкости конденсаторов на ±5 % уменьшает напряжение на 8–14 % независимо от знака, так как смещает резонанс фильтра относительно несущей частоты. Отклонение напряжения генератора на ±5 % переходит в напряжение на приемнике почти пропорционально.

Покрыть разброс увеличением запаса в таблице нельзя без ущерба для шунтового режима. Чтобы напряжение в нормальном режиме оставалось не ниже 0,40 В у 99 % реализаций, табличное значение пришлось бы увеличить с 0,42 до 0,58 В, т. е. заложить запас 46 %. Напряжение в шунтовом режиме при этом возросло бы в 1,39 раза по сравнению с номинальным расчетом, а в наихудшей реализации – почти вдвое. Таким образом, при регулировке только по таблице надежность нормального режима и безопасность шунтового режима противоречат друг другу.

Отношение напряжения на приемнике в нормальном режиме к наибольшему напряжению в шунтовом режиме, рассчитанное при номинальных параметрах, составляет 2,96 (0,42 и 0,142 В), а при разбросе параметров меняется мало – от 2,81 до 3,19. Следовательно, разброс параметров аппаратуры действует в основном как общий множитель коэффициента передачи тракта. Если напряжение генератора устанавливается по фактическому напряжению на приемнике, а не только по таблице, превышение напряжения в шунтовом режиме над номинальным не превышает 5 %. Опасность представляет поэтому не сам разброс, а изменение параметров после регулировки. Ухудшение контактов, изменение сопротивления рельсов с температурой, старение конденсаторов уменьшает запас нормального режима или увеличивает напряжение в шунтовом режиме без повторной регулировки.

Практический вывод из этого состоит в том, что для безопасности важен контроль изменения коэффициента передачи тракта после регулировки. Поскольку параметры аппаратуры влияют на напряжения нормального и шунтового режимов почти одинаково, снижение или рост напряжения на приемнике в нормальном режиме относительно значения, зафиксированного при регулировке, с точностью до нескольких процентов указывает на такое же изменение напряжения в шунтовом режиме. Это позволяет использовать измерения нормального режима, которые выполняются непрерывно средствами диагностики, для косвенной оценки запаса шунтового режима, который непрерывно измерить нельзя.

Результаты получены при равномерных распределениях параметров в принятых пределах и наихудших значениях сопротивления изоляции. При других законах распределения доли реализаций изменятся, но вывод о соотношении влияния параметров и о сохранении отношения напряжений режимов от закона распределения не зависит.

Полученные результаты показывают, что при регулировке ТРЦ необходимо учитывать разброс параметров аппаратуры, в первую очередь входного сопротивления путевого приемника и сопротивления монтажа путевого фильтра, а цифровая модель с параметрами, определенными по измерениям, позволяет оценить требуемый запас для каждого конкретного типа рельсовой цепи.

Список литературы

1 **Аркатов, В. С.** Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – 2-е изд. – М. : Транспорт, 1990. – 295 с.

2 Корректный метод контроля и расчета параметров сигналов тональных рельсовых цепей / Ю. А. Кравцов, В. И. Линьков, П. Е. Мащенко [и др.] // Наука и техника транспорта. – 2009. – № 4. – С. 37–43.

3 Теоретические и практические аспекты измерения А-параметров эквивалентного четырехполюсника путевого фильтра тональной рельсовой цепи / Р. Р. Юсупов, А. С. Хохрин, Е. Г. Щербина [и др.] // Автоматика на транспорте. – 2026. – Т. 12, № 2. – С. 89–113.

4 **Медведев, Д. Д.** Анализ искажений амплитудно-манипулированного сигнала контроля рельсовых линий / Д. Д. Медведев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2024. – № 1 (48). – С. 17–23.

УДК 656.25

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ FMECA-АНАЛИЗА СИСТЕМ ЖАТ В ЧАСТИ ИМИТАЦИИ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

К. А. БОЧКОВ, С. Н. ХАРЛАП, Е. П. ЛИТВИНОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Современные микроэлектронные системы железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) являются ключевыми элементами обеспечения безопасности движения поездов. Их проектирование и внедрен ие требуют обязательного подтверждения соответствия требованиям функциональной безопасности в соответствии с действующими нормативными документами и международными стандартами.

Одним из основных методов доказательства безопасности является анализ видов, последствий и критичности отказов (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis – FMECA) [1], включающий определение критериев и видов отказов, их имитацию, анализ последствий и расчет интенсивности возникновения опасных отказов [2] для всей анализируемой системы.

Высокая сложность современных устройств и большое количество моделируемых отказов делают проведение FMECA-анализа трудоемкой задачей, подверженной риску систематических ошибок, связанных с человеческим фактором. Однако четкая последовательность этапов анализа позволяет эффективно автоматизировать данный процесс, что особенно актуально для систем ЖАТ, где необходимы высокая точность и воспроизводимость результатов.

С этой целью, начиная с 2023 года, на базе научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и ЭМС технических средств» разрабатывается программный комплекс (ПК) для автоматизации проведения FMECA-анализа систем ЖАТ [3–5], включающий три модуля: «CircuitAnalyzer2», «FailureAnalyzer» и «FailureTreeBuilder». Каждый модуль отвечает за свой аспект проведения FMECA-анализа:

1) «CircuitAnalyzer2» – выполняет моделирование электронных схем с внесенными отказами;

2) «FailureAnalyzer» – выполняет анализ и классификацию отказов по результатам моделирования, полученным с помощью программы CircuitAnalyzer2;

3) «FailureTreeBuilder» выполняет:

а) построение дерева опасных отказов всей исследуемой системы с использованием логических узлов и групп оконечных критериев;

б) расчет интенсивностей отказов всех логических узлов построенного дерева;

в) отображение в графическом формате получившегося дерева опасных отказов.

Наиболее сложным в реализации является модуль моделирования работы исследуемой электронной схемы с имитацией отказов электронных компонентов «CircuitAnalyzer2».

Данный модуль базируется на методе имитации отказов электронных компонентов за счет изменения внутренних параметров SPICE-модели электронного компонента [6].

Однако как показала практика, данный подход не может в полной мере реализовать все типовые отказы электронных компонентов из [7], поэтому можно выделить следующие направления развития данного метода:

1 Расширение метода до структурно-параметрического, что позволит вносить дополнительные структурные эквиваленты, например последовательный резистор огромного номинала для имитации обрыва.

2 Возможность вносить одновременно несколько отказов, так как есть электронные компоненты, требующие одновременного внесения нескольких отказов (например, транзисторы).

3 Подход для описания отказов макромоделей, так как есть электронные компоненты, которые могут быть представлены объемными макромоделями SPICE. В рамках таких макромоделей один компонент может быть описан большим количеством внутренних электронных компонентов (например, SPICE-макромодели конденсаторов, имеющие в своем составе большое количество базовых конденсаторов, резисторов и катушек индуктивности, чтобы как можно точнее описать работу реальной модели конденсатора при разных режимах работы).

Таким образом, проведенный анализ возможностей разработанного программного комплекса показал, что дальнейшее повышение степени автоматизации FMECA-анализа связано прежде всего с расширением возможностей имитации отказов электронных компонентов. Для этого определены три основных направления развития модуля CircuitAnalyzer2: введение структурных эквивалентов отказов, поддержка одновременной имитации нескольких отказов и учет особенностей SPICE-макромоделей. Реализация указанных направлений позволит расширить перечень моделируемых отказов и повысить полноту автоматизированного FMECA-анализа микроэлектронных систем ЖАТ.

Список литературы

1 **Харлап, С. Н.** Обзор существующих средств автоматизации FMECA-анализа / С. Н. Харлап, В. Л. Катков, Е. П. Литвинов // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т. трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 234–236.

2 Особенности методов анализа видов и последствий отказов устройств ЖАТ / С. Н. Харлап, Д. Д. Медведев, С. И. Хоменко [и др.] // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж. д., Гомель, 24–25 нояб. 2022 г. : в 2 ч. Ч. 1. / под общей ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 227–230.

3 **Харлап, С. Н.** Программное обеспечение для проведения анализа FMECA микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / С. Н. Харлап, В. Л. Катков // Проблемы безопасности на транспорте : материалы X Междунар. науч.-

практ. конф. : в 5 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т. трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2020. – С. 43–44.

4 **Харлап, С. Н.** Программное обеспечение для автоматической классификации последствий отказов при проведении FMECA-анализа устройств СЖАТ / С. Н. Харлап, В. Л. Катков, Е. П. Литвинов // Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1 – Донецк : ДИЖТ, 2024. – С. 140–145.

5 **Харлап, С. Н.** Программный комплекс для автоматического построения дерева отказов по результатам выполнения FMECA-анализа устройств СЖАТ / С. Н. Харлап, Е. П. Литвинов // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2024. – С. 233–235.

6 **Бочков, К. А.** Метод имитации отказов диода за счет изменения параметров его SPICE-модели в рамках проведения FMECA-анализа микроэлектронных систем ЖАТ / К. А. Бочков, С. Н. Харлап, Е. П. Литвинов // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2026. – № 1. – С. 8–13.

7 EN 50129:2018. Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety-related electronic systems for signaling = EN 50129:2018 «Железные дороги – Системы связи, сигнализации и обработки данных – Электронные системы сигнализации, связанные с безопасностью». – URL: https://ru.scribd.com/document/850612791/BS-en-50129-2018-Safety-Related-Systems-for-Electronic-Signalling (дата обращения: 07.03.2026)

УДК 621.317.33

РАЗРАБОТКА ПРИБОРА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ВИТКОВ И ОБРЫВОВ В ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

И. Л. ГРОМЫКО, В. Н. ГАЛУШКО, В. В. САВИЦКАЯ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Рост промышленности, цифровизации и ИИ повышает спрос на электроэнергию; дефицит энергоресурсов и повышение цен подчеркивают необходимость эффективного использования и продления срока службы энергетического оборудования.

Одна из частых причин выхода из строя электрических машин, трансформаторов и другого энергетического оборудования, содержащего обмотки, – это межвитковые короткие замыкания. Традиционные методы испытаний включают в себя измерение различных параметров, таких как полное сопротивление короткого замыкания, потери холостого хода, коэффициент трансформации, ток намагничивания, сопротивление обмотки, анализ состояния масла и др. В качестве информативных параметров используются напряжения, токи, мощности, частичные разряды, анализ растворенного газа [1, 2], спектроскопия, индекс поляризации, коэффициент диэлектрической проницаемости [3], сопротивление изоляции, измерение напряжения восстановления, ток поляризации и деполяризации, анализ трансформаторного масла [4], FRA и другие.

В [5] описан прибор, позволяющий определить межвитковые короткие замыкания в обмотках трансформаторов и дросселей. Прибор представляет собой генератор низких частот, собранный на двух транзисторах. Конструктивное выполнение схемы простое, что позволяет его собрать без больших материальных и временных затрат. Недостатком данного прибора является отсутствие возможности однозначного определения вида неисправности обмотки. Поэтому нет возможности отличить межвитковое замыкание от обрыва цепи.

В статье [6] приведены обзор и сравнительный анализ методов определения межвитковых коротких замыканий в трансформаторах, основанные на анализе следующих параметров: разности между первичным и вторичным напряжением каждой из фаз трансформатора и током первичной обмотки; преобразования Парка; тока отрицательной последовательности. Все три метода показали себя как достаточно эффективные, однако требуют наличия дорогостоящего оборудования.

Довольно интересный метод обнаружения межвитковых коротких замыканий был предложен в статье [7]. Данный метод основан на анализе тока холостого хода первичной обмотки. Основным преимуществом метода является реализация в режиме реального времени, что делает его альтернативой традиционным методам.

Что касается железнодорожной отрасли, то в статье [8] было проведено исследование межвитковых коротких замыканий в бортотяговом трансформаторе для высокоскоростных железных дорог. Однако это исследование было основано на только теоретических расчетах.

В целом все приведенные методы требуют наличия дорогостоящего оборудования и высококвалифицированного персонала для проведения качественной диагностики.

В данном материале представлен обзор на прибор ГРОМ-13 (рисунок 1), разработанный студентами и преподавателями БелГУТа.



Рисунок 1 – Внешний вид прибора ГРОМ-13

Ключевая задача данного прибора – ранняя диагностика дефектов (межвитковые КЗ и обрывы в обмотке) для повышения надёжности и продления эксплуатации.

Принцип работы данного прибора достаточно прост. Данный прибор является универсальным LC-генератором, в котором обмотка исследуемого устройства служит индуктивностью. Генератор состоит из конденсатора, электронного сопротивления, автогенератора и регулируемого электронного сопротивления под управлением микропроцессора. При штатной обмотке настраиваемые параметры обеспечивают устойчивые колебания; при обрыве или межвитковом КЗ колебания прекращаются.

Порядок использования данного прибора следующий:

1 Настройка. Для определения дефекта в обмотке электрической машины необходимо настроить прибор на точно такую, но полностью рабочую обмотку. После подключения к рабочей обмотке и включения прибора для запуска настройки необходимо нажать на жёлтую кнопку. Результаты настройки заносятся в память устройства, чтобы после выключения и включения не настраивать прибор снова.

2 Основная работа. После завершения настройки необходимо подключить исследуемую обмотку. Если исследуемая обмотка находится в нормальном состоянии, на дисплее прибора будет отображаться надпись «Нормальное состояние». В случае обнаружения дефекта (межвиткового КЗ или обрыва) на дисплее будет надпись «Межвитковое КЗ» или «Обрыв».

По сравнению с аналогичными приборами диагностики данный прибор обладает простотой конструкции, удобен в использовании и имеет высокую чувствительность.

Список литературы

1 **Mahmoudi, N.** Experiences with transformer diagnosis by DGA: case studies / N. Mahmoudi, M. H. Samimi, H. Mohseni // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2019. – Vol. 13, № 23. – P. 5431–5439. – DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.1056.

2 **Behjat, V.** A new statistical approach to interpret power transformer frequency response analysis: Nonparametric statistical methods / V. Behjat, M. Mahvi, E. Rahimpour // 2015 30th International Power System Conference (PSC). – Tehran, Iran, 2015. – P. 142–148. – DOI: 10.1109/IPSC.2015.7827740.

3 Evaluation of numerical indices for the assessment of transformer frequency response / M. H. Samimi, S. Tenbohlen, A. A. S. Akmal, H. Mohseni // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2017. – Vol. 11, № 1. – P. 218–227. – DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.0879.

4 Turn-to-Turn Short Circuit Fault Localization in Transformer Winding via Im-age Processing and Deep Learning Method / A. Moradzadeh, H. Moayyed, B. Mo-hammadi-Ivatloo [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2022. – Vol. 18, № 7. – P. 4417–4426. – DOI: 10.1109/TII.2021.3105932.

5 **Кривонос, А. В.** Определение короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов и дроселей / А. В. Кривонос // Радио. – 1968. – № 4. – С. 56.

6 Comparison of Online Techniques for the Detection of Inter-Turn Short-Circuits in Transformers / G. Leal, M. Meira, C. Verucchi [et al.] // XIX Workshop on Infor-mation Processing and Control (RPIC), SAN JUAN. – Argentina, 2021. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/RPIC53795.2021.9648509.

7 Detection of Inter-turn Short Circuits in Power Transformers by No-load Current Analysis / M. Meira, C. Verucchi, C. Ruschetti [et al.] // XVIII Workshop on Infor-mation Processing and Control (RPIC). – Salvador, Brazil, 2019. – P. 59–64. – DOI: 10.1109/RPIC.2019.8882178.

8 Investigation on Interturn Short-Circuit Faults in an Onboard Traction Trans-former for High-Speed Railway / C. Yan, W. Wang, P. Zhang [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. – DOI: 10.1109/TMAG.2023.3290361.

УДК 004.056

РАЗРАБОТКА БРАУЗЕРНОГО РАСШИРЕНИЯ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ВЕБ-БОТОВ

Д. А. ЕЛИЗАРОВ, Е. П. ОРЛОВСКИЙ
Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация

Целью работы является разработка браузерного расширения, способного в реальном времени анализировать поведенческие метрики пользователя и вычислять вероятность автоматизированных действий. Система отслеживает кинематику движений мыши (траектории, ускорение, микропаузы), временные параметры взаимодействий (задержки между наведением и кликом, скорость ввода текста) и динамику сессии (вариативность активностей).

На основе собранных данных алгоритм вычисляет индекс «человекоподобия» в процентном выражении, например 82 % соответствия естественному поведению. Подозрительные паттерны (линейные перемещения курсора, метрономные задержки ровно 500 мс, отсутствие хаотичных микродвижений) фиксируются в логах с привязкой к временным меткам [1].

Расширение предоставляет визуализацию анализа через popup-интерфейс: график динамики поведенческого скора, heatmap перемещений мыши и список детектированных аномалий. Для разработчиков доступен экспорт сырых данных (координаты курсора с таймстемпами, временные интервалы между событиями) в формате JSON для последующего анализа. Критически важной особенностью является работа в фоновом режиме без влияния на производительность браузера.

Для проверки браузерного расширения был написан скрипт, который его тестирует и показывает, что действия совершает бот. Данный скрипт реализует стандартные действия: перемещает мышь вправо на 5 шагов, кликает в конце перемещения, нажимает клавиши a, s, d с паузой, прокручивает страницу вниз плавно 20 раз по 2 пикселя.

При запуске браузерного расширения, если не выполняются никакие действия, то все показатели будут нулевыми, кроме «бездействия» и «времени на странице», так как для того чтобы сделать вывод является ли пользователь человеком или ботом, ему нужно время на анализ собранных данных. Данный результат показан на рисунке 1.

Для проверки расширения необходимо совершать действия: двигать мышью, совершать клики, скроллы, нажимать на клавиши и т. д. Результат представлен на рисунке 2.

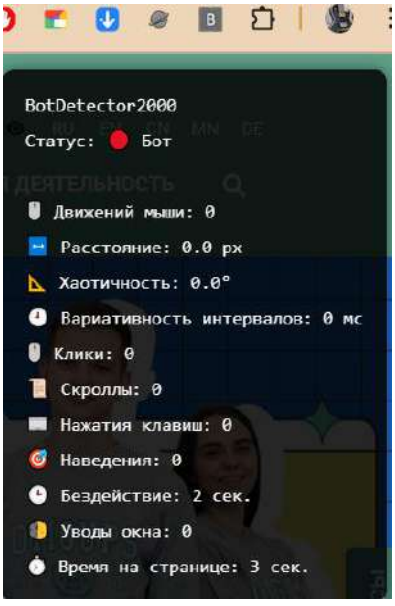


Рисунок 1 – Запуск браузерного расширения

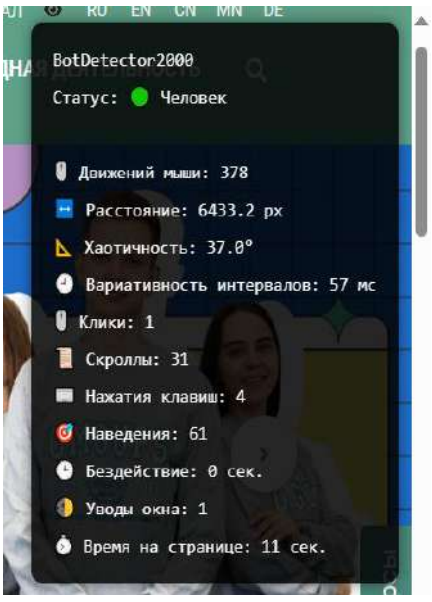


Рисунок 2 – Идентификация человека с помощью браузерного расширения

Во время тестирования человеком расширение распознало его как «человека», что свидетельствует о его корректной работе.

Далее через консоль браузера был запущен скрипт, который выполняет действия на странице как бот, чтобы протестировать, сможет ли расширение распознать бота. Результат детектирования действий со стороны бота представлен на рисунке 3.

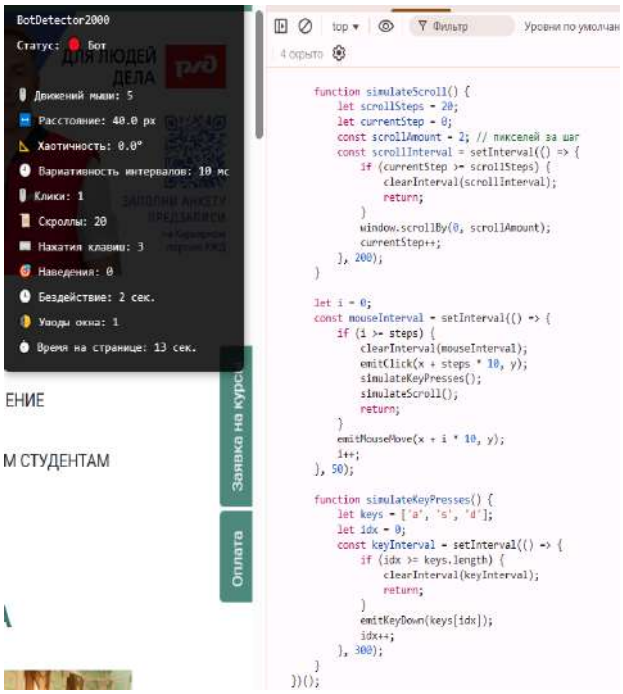


Рисунок 3 – Идентификация бота с помощью браузерного расширения

Разработанная программа предназначена для решения задачи детектирования автоматизированных средств подмены пользователя (веб-ботов), имитирующих действия легитимных пользователей в веб-ресурсах и информационных системах.

Список литературы

1 **Afanaseva, N. S.** Machine Learning Classification to Detect Bots Using Mouse Movement / N. S. Afanaseva, P. S. Lozhnikov // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Omsk, Russia, 11–13 nov. 2025. – Piscataway : IEEE, 2025. – P. 11302154. – DOI: 10.1109/Dynamics68764.2025.11302154.

УДК 004.052.32+681.518.5

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА САМОПРОВЕРЯЕМЫХ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛОВ И КОДОВ БОРДЕНА

Д. В. ЕФАНОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация
Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, г. Санкт-Петербург
Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва
Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

Коды Бордена предложены в [1]. Они относятся к так называемым d_{υ}-*UED*-кодам (d_{υ}-unidirectional error-detection codes) – к кодам, обнаруживающим любые однонаправленные искажения в кодовых словах до заданной их кратности d_{υ}. Строятся коды Бордена следующим образом. Фиксируется число d_{υ}: $2 \le d_{\upsilon} \le \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$. Далее выбираются все кодовые слова с весом r и длиной n, удовлетворяющие равенству $C(n, d_{\upsilon}) = \bigcup_{r=\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor (\mathrm{mod}(d_{\upsilon}+1))} C_{r/n}$. Отсюда становится ясным, что множество

кодовых слов кодов Бордена образуется из множеств кодовых слов отдельных равновесных кодов [2]. К примеру, при $d_v = 2$ и $n = 5$ существует один код Бордена, множество кодовых слов которого образовано из множеств кодовых слов равновесных кодов «2 из 5» и «5 из 5». Отметим, что в [3] изучены основные свойства кодов Бордена, учет которых может оказаться полезным при синтезе самопроверяемых дискретных устройств. К слову, коды Бордена можно отнести к так называемым композициям равновесных кодов, полное множество которых описано в [4], а в [5] приведен другой частный случай композиций четного числа равновесных кодов, множество кодовых слов которых разбивается на пары ортогональных слов по всем разрядам, эффективно применяемый при контроле вычислений на основе логической коррекции сигналов (ЛКС) и проверке формируемых кодовых слов в схемах встроенного контроля (СВК) принадлежности к кодовым словам заданной композиции и самодвойственности каждой функции, описывающей разряды кодовых слов. Теория синтеза тестеров кодов Бордена хорошо проработана [6–8]. Однако методы синтеза самопроверяемых дискретных устройств на их основе изучены недостаточно. Например, абсолютно не исследованными оказались методы, основанные на использовании при синтезе СВК принципов ЛКС совместно с кодами Бордена. Именно восполнению данного пробела в теории синтеза самопроверяемых дискретных устройств и посвящена настоящая работа.

Основные методы синтеза СВК изложены в [9]. Принцип ЛКС подразумевает коррекцию значений с выходов объекта диагностирования $F(X)$, образующих кодовый вектор $<f_n(X)\, f_{n-1}(X)\, ...\, f_2(X)\, f_1(X)>$, при поступлении на его входы каждого из наборов значений аргументов $<X> = <x_t\, x_{t-1}\, \dots\, x_2\, x_1>$ в СВК таким образом, чтобы получаемое на выходах блока коррекции сигналов (БКС) кодовое слово $<h_n(X)\, h_{n-1}(X)\, ...\, h_2(X)\, h_1(X)>$ принадлежало выбранному равномерному блоковому коду (в рассматриваемом случае – коду Бордена). Такая коррекция возможна за счет использования блока $G(X)$, формирующего значения функций коррекции сигналов $g_i(X)$, $i = \overline{1, n}$, при подаче на входы тех же наборов значений аргументов, что и на объект диагностирования, а также за счет использования в БКС двухвходовых элементов сложения по модулю два (XOR), на входы которых подаются значения функций $f_i(X)$ и $g_i(X)$. На этапе проектирования СВК устанавливается однозначное соответствие между данными значениями на каждом наборе значений аргументов и в процессе эксплуатации устройства оно проверяется с применением самопроверяемого тестера *TSC* (totally self-checking checker). Структура организации самопроверяемого дискретного устройства приведена на рисунке 1.

В структуре, приведенной на рисунке 1, корректируются сигналы со всех выходов объекта диагностирования. Особенности структур с коррекцией всех сигналов изложены автором в ряде работ, например в [10, 11]. Однако при использовании кодов Бордена удается сократить количество минимально необходимых корректируемых сигналов от объекта диагностирования, поскольку используется большее количество кодовых слов с различным значением веса r. Снижение числа корректируемых сигналов способствует снижению показателей структурной избыточности СВК за счет уменьшения числа элементов коррекции и числа выходов блока $G(X)$, а также упрощает процедуру тестирования элементов БКС в процессе эксплуатации самопроверяемого дискретного устройства.

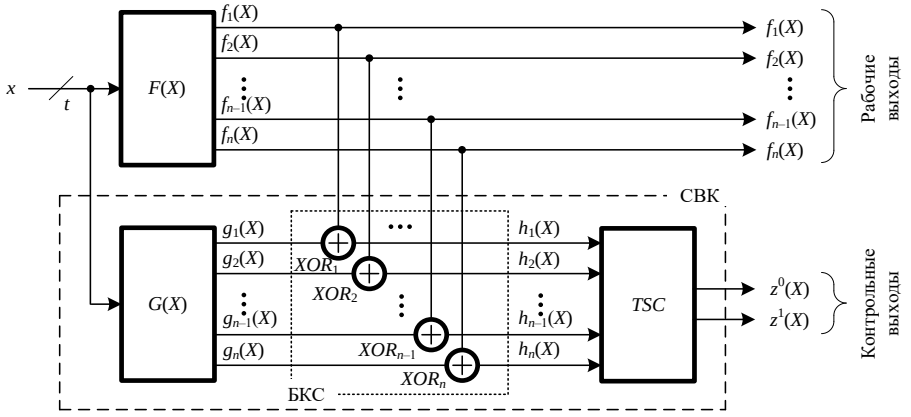


Рисунок 1 – Структура организации самопроверяемого дискретного устройства

В ходе исследований автором доказаны следующие положения, характеризующие преимущества использования кодов Бордена при синтезе самопроверяемых дискретных устройств по сравнению с применением равновесных кодов.

Теорема 1. *Минимально необходимое количество элементов коррекции в СВК, организованной на основе ЛКС и кода Бордена, не зависит от числа* n *и равно* $p_{\min} = d_v$.

Теорема 2. *Значение доли минимально необходимого числа элементов коррекции при использовании кодов Бордена от аналогичного показателя при использовании отдельных равновесных кодов для постоянного значения* d_v *снижается с ростом* n.

Иными словами, использование кодов Бордена высокоэффективно для улучшения показателей СВК (структурной избыточности, контролепригодности, быстродействия, энергозатрат и пр.) в сравнении с использованием равновесных кодов, а с ростом значения *n* применяемого кода этот эффект только растет.

Учитывая отмеченные особенности кодов Бордена, целесообразно обратить внимание на их применение при разработке и проектировании высоконадежных и безопасных дискретных систем и устройств. Следует отметить, что для таких устройств обеспечивается гарантированное покрытие неисправностей из заданной модели и вызываемых ими ошибок на выходах контролируемых устройств [12]. Поэтому методы и алгоритмы синтеза самопроверяемых дискретных устройств следует применять при разработке автоматизированных и автоматических средств управления технологическими процессами и производствами во всех отраслях экономики, где они в принципе используются.

Список литературы

1 **Borden, J. M.** Optimal Asymmetric Error Detecting Codes / J. M. Borden // Information and Control. – 1982. – Vol. 53, is. 1–2. – P. 66–73. – DOI: 10.1016/S0019-9958(82)91125-1.

2 **Freiman, C. V.** Optimal Error Detection Codes for Completely Asymmetric Binary Channels / C. V. Freiman // Information and Control. – 1962. – Vol. 5, is. 1. – P. 64–71. – DOI: 10.1016/S0019-9958(62)90223-1.

3 **Ефанов, Д. В.** Особенности обнаружения ошибок кодами Бордена / Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. – 2019. – Т. 41, № 6. – С. 49–64. – DOI: 10.15407/emodel.41.06.049.

4 **Efanov, D. V.** On the Compositions of Constant-Weight Codes for the Synthesis of Self-Checking and Controllable Digital Devices / D. V. Efanov, Y. I. Yelina // Proceedings of 21st IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2025), Tbilisi, Georgia, 5–8 December 2025. – P. 1–10. – DOI: 10.1109/EWDTS67441.2025.11303696.

5 **Ефанов, Д. В.** Композиции двух равновесных кодов с ортогональными по всем разрядам комбинациями для синтеза самопроверяемых дискретных устройств / Д. В. Ефанов // Проблемы управления. – 2025. – № 3. – С. 49–62. – EDN: QXTHQB.

6 **Haniotakis, T.** Efficient Totally Self-Checking Checkers for f Class of Borden Codes / T. Haniotakis, A. Paschalis, D. Nikolos // IEEE Transactions on Computers. – 1995. – Vol. 44, is. 11. – P. 1318–1322. – DOI: 10.1109/12.475127.

7 **Piestrak, S. J.** Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes / S. J. Piestrak. – Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p.

8 **Tarnick, S.** Self-Testing Embedded Borden t-UED Code Checkers for $t = 2^k q - 1$ with $q = 2^m - 1$ / S. Tarnick // Journal of Electronic Testing: Theory and Application (JETTA). – 2008. – Vol. 24. – P. 509–527. – DOI: 10.1007/s10836-008-5073-3.

9 **Ефанов, Д. В.** Методы синтеза самопроверяемых дискретных устройств / Д. В. Ефанов. – М. : ЛЕНАНД, 2025. – 268 с.

10 **Ефанов, Д. В.** Использование равновесного кода «1 из 4» при синтезе самопроверяемых схем встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов / Д. В. Ефанов // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2025. – № 72. – С. 114–133. – DOI: 10.17223/19988605/72/12.

11 **Ефанов, Д. В.** Синтез самопроверяемых дискретных устройств на основе логической коррекции сигналов с применением равновесного кода «1 из 3» / Д. В. Ефанов // Известия Российской Академии наук. Теория и системы управления. – 2025. – № 5. – С. 61–77. – DOI: 10.31857/S0002338825050052.

12 **Согомонян, Е. С.** Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.

УДК 004.052.32+681.518.5

ПРИМЕНЕНИЕ РАВНОВЕСНОГО КОДА «3 из 6» ПРИ СИНТЕЗЕ САМОПРОВЕРЯЕМЫХ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ

Д. В. ЕФАНОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация

Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва

Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

При синтезе управляющих дискретных систем широко применяются методы и технические средства своевременного обнаружения неисправностей и ошибок в вычислениях на различных уровнях реализации [1–3]. Их использование позволяет оперативно реагировать на возникающие

отклонения в работе устройств, парировать дестабилизирующие проявления, реконфигурировать архитектуры управляющих блоков и узлов, а также обеспечивать отказоустойчивость и живучесть самих систем.

В [4] предложено использовать при синтезе самопроверяемых дискретных устройств принцип логической коррекции сигналов (ЛКС), заключающийся в отличии от классических подходов с дополнением информационных сигналов контрольными в схемах встроенного контроля (СВК) [5] возможностью преобразования в СВК сигналов от объекта диагностирования в сигналы специального вида. Это могут быть любые логические преобразования сигналов 0 и 1 в аналогичные сигналы на каждом наборе значений аргументов. Такие преобразования осуществляются с использованием логической связки «сложение по модулю 2», реализуемой элементом XOR, либо связки «эквивалентность», реализуемой элементом XNOR.

В [4] описан метод, подразумевающий использование равновесных кодов «r из n» (r/n, r – вес, n – длина кодового слова) на примере применения равновесного кода 1/3 при синтезе СВК для дискретных устройств, основанный на анализе кодовых слов, формируемых на выходах объекта диагностирования на каждом наборе значений аргументов, и их коррекции в кодовые слова данного кода с учетом обеспечения тестируемости элементов коррекции и тестера. Особенностью метода является то, что требуется коррекция только двух сигналов из трех в выделяемом подмножестве выходов объекта диагностирования. В [6] предложено установить изначальную зависимость между значениями на выходах объекта диагностирования и блока вычисления функций коррекции на каждом возможном трехбитном кодовом слове и применять автоматически при проектировании СВК. Здесь также подразумевается коррекция двух сигналов из трех от объекта диагностирования. В [7] аналогичные идеи развиваются на случай коррекции всех трех сигналов в выделенном подмножестве выходов объекта диагностирования в СВК, что открывает колоссальное количество способов построения самопроверяемых дискретных устройств. Аналогичные исследования проведены и для использования иных равновесных кодов, например 1/4 и 3/4 [8, 9].

Особняком стоит использование равновесного кода 2/4 [10]. Особенностью использования именно данного кода является то, что можно корректировать минимальную долю сигналов в выделенном подмножестве выходов для всех равновесных кодов. Это существенно влияет на процедуры обеспечения тестируемости компонентов СВК и на ее структурную избыточность. Исследования на тестовых схемах MCNC Benchmarks [11] подтверждают высокоэффективное использование данного равновесного кода для синтеза самопроверяемых комбинационных устройств и конечных автоматов. До настоящего времени считалось, что наилучшими свойствами в СВК на основе ЛКС обладают именно равновесные коды с малыми значениями длин кодовых слов.

В таблице 1 приведены различные равновесные коды и указано минимально необходимое количество $p_{\min}$ корректируемых сигналов в СВК при использовании каждого из них. Для наглядности в таблице 2 рассчитано значение коэффициента $\zeta_{n,r} = \frac{p_{\min}}{n}$. Анализ значений коэффициента $\zeta_{n,r}$ показывает, что минимальное его значение $\zeta_{n,r} = 0{,}5$ достигается не только для кода 2/4, но и для всех кодов вида $r/2r$. Таким образом, для всех таких равновесных кодов удается использовать минимально необходимое количество элементов коррекции в СВК, а также уменьшать максимальное количество выходов блока вычисления функций коррекции. Гипотетически использование кодов $r/2r$ с наиболее простыми структурами тестеров [12] может оказаться высокоэффективным при синтезе самопроверяемых дискретных устройств.

Таблица 1 – **Значения $p_{\min}$ при использовании равновесных кодов с малыми значениями n**

n	$p_{\min}$					
	2	3	4		6	7
3	1/3, 2/3	–	–	–		–
4	2/4	1/4, 3/4	–	–	–	–
5	–	2/5, 3/5	1/5, 4/5	–	–	–
6	–	3/6	2/6, 4/6	1/6, 5/6	–	–
7	–	–	3/7, 4/7	2/7, 5/7	1/7, 6/7	–
8	–	–	4/8	3/8, 5/8	2/8, 6/8	1/8, 7/8

Таблица 2 – **Значение показателя $\zeta_{n,r}$ для различных равновесных кодов**

n	$p_{\min}$					
	2	3	4	5	6	7
3	0,667	–	–	–	–	–
4	0,5	,7	–	–	–	–
5	–	0,6	0,8	–	–	–
6	–	0,5	0,667	0,833	–	–
7	–	–	0,571	0,714	0,857	–
8	–	–	0,5	0,625	0,75	0,875

Автором настоящей работы исследовано применение следующего за кодом 2/4 кода с $\zeta_{n,\,r} = 0{,}5$ – кода 3/6. Для него существует довольно простая структура тестера (см. рисунок 2.8 из [12]), требующая для своей полной проверки всего 6 комбинаций

$$T_{3/6-TSC} = \{111000,\, 011100,\, 001110,\, 110001,\, 100011,\, 000111\}. \quad (1)$$

Учитывая это, а также наличие трех элементов коррекции в СВК, автором найден простой способ установления зависимости между сигналами на выходах объекта диагностирования и выходах блока вычисления функций коррекции, позволяющий синтезировать самопроверяемые дискретные устройства. Функции $g_i(X)$, формируемые на выходах блока вычисления значений функций коррекции, зависят от функций объекта диагностирования $f_i(X)$, $i = \overline{1,\,6}$, $<X> = <x_t\, x_{t-1}\, \ldots\, x_2\, x_1>$ – конкретный набор значений аргументов следующим образом:

$$\begin{cases} g_3(X) = \overline{f_3(X) \oplus f_6(X)} = f_3(X) \sim f_6(X), \\ g_2(X) = \overline{f_2(X) \oplus f_5(X)} = f_2(X) \sim f_5(X), \\ g_1(X) = \overline{f_1(X) \oplus f_4(X)} = f_1(X) \sim f_4(X). \end{cases} \quad (2)$$

Эксперименты с тестовыми схемами MCNC Benchmarks демонстрируют высокую эффективность применения системы (2) при синтезе самопроверяемых дискретных устройств с выделением подмножеств выходов объекта диагностирования мощностью 6.

Сравнение системы формул (2) с системой формул (2) из [10] говорит о схожести структур самих формул. Можно гипотетически ожидать для равновесных кодов с $r \geq 4$ существование схожих по структурам формул, указывающих на зависимости между значениями на выходах объекта диагностирования и блока вычисления функций коррекции в СВК, позволяющих сформировать проверяющие тесты для элементов коррекции и тестера равновесного кода. Также следует отметить, что кодовые слова равновесных кодов вида $r/2r$ могут быть разбиты на пары ортогональных по всем разрядам кодовых слов, что позволяет эффективно использовать их при синтезе СВК с контролем вычислений как по принадлежности кодовых слов равновесному коду, так и по принадлежности каждой функции, описывающей разряды кодовых слов, классу самодвойственных булевых функций [13]. Принципы синтеза самопроверяемых дискретных устройств с контролем вычислений по двум и более диагностическим признакам описаны в [14].

Отмеченные выше преимущества равновесных кодов вида $r/2r$ (и непосредственно кода 3/6) позволяют считать их применение при синтезе самопроверяемых дискретных устройств крайне перспективным с использованием не только классических подходов, но и принципа ЛКС.

Список литературы

1 Application of Error Detection and Correction Techniques to Self-Checking VLSI Systems: An Overview / A. R. Sahana, V. Chiraag, G. Suresh [et al.] // Proceedings of 2023 IEEE Guwahati Subsection Conference (GCON). – Guwahati, 2023. – DOI: 10.1109/GCON58516.2023.10183449.

2 **Chioktour, V.** Adaptive BIST for Concurrent On-Line Testing on Combinational Circuits / V. Chioktour, A. Kakarountas // Electronics. – 2022. – Vol. 19, is. 11. – P. 1–20. – DOI: 10.3390/electronics11193193.

3 Методы мониторинга технического состояния систем в целях управления их избыточностью. Ч. 1. Встроенные средства контроля и разбиение на классы / В. Н. Буков, А. М. Бронников, А. С. Попов, В. А. Шурман // Проблемы управления. – 2025. – № 2. – С. 3–13. – EDN: JPTGFA.

4 Логическое дополнение – новый метод контроля комбинационных схем / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 167–176.

5 **Согомонян, Е. С.** Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.

6 **Сапожников, В. В.** Построение полностью самопроверяемых структур систем функционального контроля с использованием равновесного кода «1 из 3» / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. – 2016. – Т. 38, № 6. – С. 25–43.

7 **Ефанов, Д. В.** Синтез самопроверяемых дискретных устройств на основе логической коррекции сигналов с применением равновесного кода «1 из 3» / Д. В. Ефанов // Известия Российской Академии наук. Теория и системы управления. – 2025. – № 5. – С. 61–77. – DOI: 10.31857/S0002338825050052.

8 **Ефанов, Д. В.** Использование равновесного кода «1 из 4» при синтезе самопроверяемых схем встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов / Д. В. Ефанов // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2025. – № 72. – С. 114–133. – DOI: 10.17223/19988605/72/12.

9 **Ефанов, Д. В.** Синтез самопроверяемых дискретных устройств на основе логической коррекции сигналов и равновесного кода «3 из 4» / Д. В. Ефанов // Известия Российской Академии наук. Теория и системы управления. – 2026. – № 2. – С. 43–56. – DOI: 10.7868/S3034644426020040.

10 **Сапожников, В. В.** Построение самопроверяемых структур систем функционального контроля на основе равновесного кода «2 из 4» / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Проблемы управления. – 2017. – № 1. – С. 57–64.

11 Collection of Digital Design Benchmarks. – URL: https://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks/ (date of access: 06.01.2025).

12 **Сапожников, В. В.** Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.

13 **Ефанов, Д. В.** К организации контроля самодвойственности булевых функций на выходах дискретных устройств на основе логической коррекции сигналов и равновесных кодов / Д. В. Ефанов // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. пятилетке качества (Гомель, 20–21 нояб. 2025 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Н. Н. Казакова. – Гомель : БелГУТ, 2025. – С. 150–152.

14 **Ефанов, Д. В.** Синтез самопроверяемых дискретных устройств на основе полиномиальных кодов с контролем вычислений по нескольким диагностическим признакам / Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров // Автоматика и телемеханика. – 2025. – № 5. – С. 39–60. – DOI: 10.31857/S0005231025050036. – EDN: AXPIOQ.

УДК 004.052.32+681.518.5

ФОРМИРОВАНИЕ РАЗДЕЛИМОГО РАВНОМЕРНОГО КОДА С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУР ОБЪЕКТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА САМОПРОВЕРЯЕМЫХ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ

Д. В. ЕФАНОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация
Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, г. Санкт-Петербург
Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва
Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

В теории синтеза самопроверяемых дискретных устройств можно выделить несколько этапов развития [1, 2]. Первый этап характеризуется использованием стандартных методов при проектировании самопроверяемых дискретных устройств, базирующихся на применении кодов с повторением и простейших равномерных блоковых кодов – кодов паритета. К слову, использование именно этих двух классов кодов является самым распространенным решением во всех областях науки и техники, где требуется применение устройств с обнаружением неисправностей [3]. Второй этап связан с использованием других равномерных блоковых кодов, ориентированных на обнаружение ошибок, и их свойств. И здесь хорошо развиты методы синтеза самопроверяемых дискретных устройств на основе равновесных кодов, кодов с суммированием и кодов Хэмминга, а также ряда их модификаций [4–7]. Во всех случаях использования методов теории информации и кодирования особенности структур схем встроенного контроля (СВК) для дискретных устройств в первую очередь определялись исключительно особенностями используемого равномерного блокового кода и «наследовали» в некоторой мере свойства этого кода. Третий этап развития теории связан с применением схемотехнических методов для построения СВК с учетом особенностей структур объектов диагностирования. И здесь важнейшим направлением является не просто использование «готового» кода для наделения устройства свойством самопроверяемости, а применение методов, основанных на построении кода исключительно с учетом свойств самих структур объекта диагностирования. Этот подход впервые демонстрируется в работах автора настоящего доклада [8, 9], а также описан в монографии [2].

Суть подходов к синтезу самопроверяемых дискретных устройств с построением кода «под схему» объекта диагностирования следующая. Фиксируются модели неисправностей, а затем определяется влияние каждой из них на двоичный вектор значений реализуемых объектом диагностирования $F(X)$ булевых функций $<f_n(X)\, f_{n-1}(X)\, ...\, f_2(X)\, f_1(X)>$ при поступлении на его входы каждого из наборов значений аргументов $<X> = <x_t\, x_{t-1}\, \dots\, x_2\, x_1>$ (или наперед оговоренных). Так определяются информационные кодовые слова, формируемые при исправной работе объекта диагностирования, а также информационные кодовые слова, формируемые при возникновении неисправностей в условиях подачи на входы объекта диагностирования наборов значений аргументов. Далее определяются условия переходов информационных слов друг в друга и производится их разбиение на подмножества таким образом, чтобы были исключены те переходы, которые недопустимы. Впоследствии каждому подмножеству ставится в соответствие отдельное контрольное кодовое слово и получаются функции, описывающие проверочные символы строящегося «под схему» кода. Они и реализуются в СВК. Именно такая идея и пример ее реализации описаны в [8, 9]. Данная идея развивается в [10], но здесь авторы не строят код для синтеза самопроверяемого дискретного устройства, а ограничиваются покрытием неисправностей с заданной вероятностью. В настоящей работе развиваются подходы к синтезу полностью самопроверяемых дискретных устройств на основе разделимых двоичных кодов, строящихся исключительно «под схему» объекта диагностирования, и отмечаются некоторые особенности таких кодов, возникающие в практических реализациях.

Исследования методов формирования разделимых двоичных избыточных кодов с учетом свойств структур объектов диагностирования и моделей неисправностей позволили установить следующие особенности самого процесса построения кода и СВК на его основе:

1 Если при построении СВК на основе известных равномерных блоковых кодов определяющими факторами являлись распределения необнаруживаемых ошибок по их видам и кратностям [11], то при формировании кода «под схему» объекта диагностирования учет видов ошибок перестает быть актуальным – требуется только обеспечить отсутствие недопустимых переходов между информационными кодовыми словами.

2 Для любого объекта диагностирования предельным случаем в классификации кодовых слов на подмножества является разделение на одноэлементные подмножества, что будет соответствовать способу организации контроля на основе кодов с повторением (такие коды используют при дублировании).

3 Неформализованным оказывается этап классификации кодовых слов на различные подмножества, и от того, какие именно информационные кодовые слова оказываются в каждом из них в большей мере, зависят показатели сложности булевых функций, а значит, и сложности кодирующих схем в СВК.

4 Наиболее эффективным при построении кода оказывается удовлетворение соотношения между числом входов и выходов объекта диагностирования $\Delta > 0$, $\Delta = n - t$, причем чем больше значение Δ, тем больше оказывается степень свободы при классификации кодовых слов в различные подмножества, что связано с малым числом используемых кодовых слов $<f_n(X)\, f_{n-1}(X)\, ...\, f_2(X)\, f_1(X)>$, но всё-таки зависит от особенностей структуры объекта диагностирования и влияния неисправностей на его выходы.

5 Использование неполного множества наборов значений аргументов $<X> = <x_t\, x_{t-1}\, \dots\, x_2\, x_1>$ для частично заданных устройств позволяет еще больше повысить степень свободы при классификации кодовых слов в различные подмножества.

6 Фиксация надежностных характеристик и непосредственно показателя вероятности обнаружения неисправности или ошибки на выходах при любых заданных их распределениях также позволяет повысить степень свободы при классификации кодовых слов в различные подмножества и способствует снижению избыточности строящегося кода, однако для каждого устройства при заданных надежностных характеристиках будет существовать свое пороговое значение для снижения избыточности кода на любую заданную величину.

Интересно, что данное направление в теории синтеза самопроверяемых дискретных устройств до сих пор оказалось не то что глубоко, но и даже поверхностно не изученным, а ведь такой фактически схемотехнический подход к построению кода для последующего синтеза СВК для устройств

позволяет не только отойти от использования заложенных в известные двоичные коды диагностических свойств, но и сформировать свой разделимый код с учетом именно особенностей такого приложения. И здесь удаляется всяческая избыточность диагностических свойств кода – он наследует именно свойства структуры объекта диагностирования и влияния модели неисправностей на распределение информационных кодовых слов с ошибками. К слову, как показано в [8, 9] построенный «под схему» код вполне может оказаться непомехозащищенным относительно любых одиночных искажений, однако при этом он по-прежнему будет позволять строить самопроверяемое дискретное устройство, но окажется непригодным для использования в иных приложениях. Формируемый код становится «индивидуальным», в чем есть одновременно и преимущества, и недостатки. Исследование методов формирования разделимого равномерного кода с учетом особенностей структур объектов диагностирования – это следующий виток развития теории синтеза самопроверяемых дискретных устройств, движение по которому откроет разработчику высоконадежных систем управления целый спектр подходов к решению задачи своевременного обнаружения неисправностей их составляющих.

Список литературы

1 **Согомонян, Е. С.** Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.

2 **Ефанов, Д. В.** Методы синтеза самопроверяемых дискретных устройств / Д. В. Ефанов. – М. : ЛЕНАНД, 2025. – 268 с.

3 Методы мониторинга технического состояния систем в целях управления их избыточностью. Ч. 1. Встроенные средства контроля и разбиение на классы / В. Н. Буков, А. М. Бронников, А. С. Попов, В. А. Шурман // Проблемы управления. – 2025. – № 2. – С. 3–13 – EDN: JPTGFA.

4 **Слабаков, Е. В.** Самопроверяемые вычислительные устройства и системы (обзор) / Е. В. Слабаков, Е. С. Согомонян // Автоматика и телемеханика. – 1981. – № 11. – С. 147–167.

5 **Сапожников, В. В.** Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. – СПб. : Наука, 2018. – 151 с.

6 **Сапожников, В. В.** Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 1: Классические коды Бергера и их модификации / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. – М. : Наука, 2020. – 383 с.

7 **Сапожников, В. В.** Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 2: Взвешенные коды с суммированием / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. – М. : Наука, 2021. – 455 с.

8 **Efanov, D. V.** The Equal-Length Redundant Code Development for the Self-Checking Combina tional Devices Synthesis Based on Data on Their Structures / D. V. Efanov // Electronic Modeling. – 2022. – Vol. 44, is. 1. – P. 43–52. – DOI: 10.15407/emodel.44.01.043.

9 **Ефанов, Д. В.** Принципы формирования равномерных избыточных кодов для синтеза самопроверяемых комбинационных устройств на основе данных об их структурах / Д. В. Ефанов // Информационные технологии. – 2022. – Т. 28, № 9. – С. 489–496. – DOI: 10.17587/it.28.489-496.

10 **Стемпковский, А. Л.** Разработка схем функционального контроля на основе автоматизированной генерации помехоустойчивого кода / А. Л. Стемпковский, Д. В. Тельпухов, Т. Д. Жукова // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2022. – № 4. – С. 2–8. – DOI: 10.31114/2078-7707-2022-4-2-8.

11 **Сапожников, В. В.** Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 5. – С. 333–343. – DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343.

УДК 621.396:621.391.82

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА ПО СПЕКТРАЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ИМПУЛЬСОВ ПОМЕХ

И. О. ЖИГАЛИН, Д. Д. МЕДВЕДЕВ, Е. В. ЯЦУШКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Устойчивость микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (МСЖАТ) к электромагнитным импульсам преднамеренного воздействия (ЭИПВ) можно оценивать косвенно – по результатам испытаний на устойчивость к электростатическому разряду (ЭСР) [1–3]. В работе решается задача: какое напряжение импульса ЭСР [4] соответствует импульсам других стандартов.

Для примера рассмотрены четыре импульса преднамеренного воздействия, аппроксимируемых биэкспоненциальным импульсом [5] (максимумы выбраны как пределы типовых генераторов):

– импульс по отчёту Meta-R-323 (далее – Meta-R-323) [6], применяемый при испытаниях на устойчивость к ЭИПВ (фронт 5 нс, длительность 50 нс, максимум 5 кВ);

– импульс поля по ГОСТ Р 52863 [7], применяемый при испытаниях на устойчивость к воздействию электромагнитным полем (длительность 100 нс, максимум 10 кВ/м);

– импульс HEMP E1 по IEC 61000-2-9 [8] – ранняя составляющая импульса высотного ядерного взрыва (фронт 2,5 нс, длительность 23 нс, максимум 50 кВ/м);

– импульс Bell Labs [9] – ещё одна модель ранней составляющей импульса высотного ядерного взрыва (фронт 4,1 нс, длительность 184 нс, максимум 50 кВ/м).

Импульсы поля приводились к напряжению на входе через эффективную длину паразитной антенны [1], принятую равной 0,1 м; импульс ЭСР – к эквивалентному напряжению источника, равному произведению тока разряда и сопротивления разрядного резистора генератора 330 Ом [4]. Энергии сравниваются на одинаковой нагрузке; различие внутренних сопротивлений источников не учитывается. Для импульса Meta-R-323 предполагается контактный разряд в цепь порта.

Точная эквивалентность импульса ЭСР импульсам, выбранным для примера, недостижима, т. к. эффективная ширина спектра у всех рассмотренных импульсов отличается. Кроме того, у стандартного генератора ЭСР разрядная цепь фиксирована и регулируется только напряжение, поэтому выбрано одностороннее условие: испытание на устойчивость к ЭСР должно быть не мягче воздействия рассматриваемых импульсов.

Испытание считаем не мягче, если энергия импульса ЭСР и ширина спектра не меньше, чем у рассматриваемых импульсов [1]. Также рассмотрим дополнительное условие: спектральная плотность ЭСР не меньше, чем у другого импульса, на частотах до 1 ГГц.

Спектр ЭСР шире, чем у рассмотренных импульсов, поэтому напряжение определяется условием по энергии (рисунок 1, *а*). Рассчитанные напряжения приведены в таблице 1.

При дополнительном условии требуются большие напряжения. Формы импульсов приведены на рисунке 1, *б*.

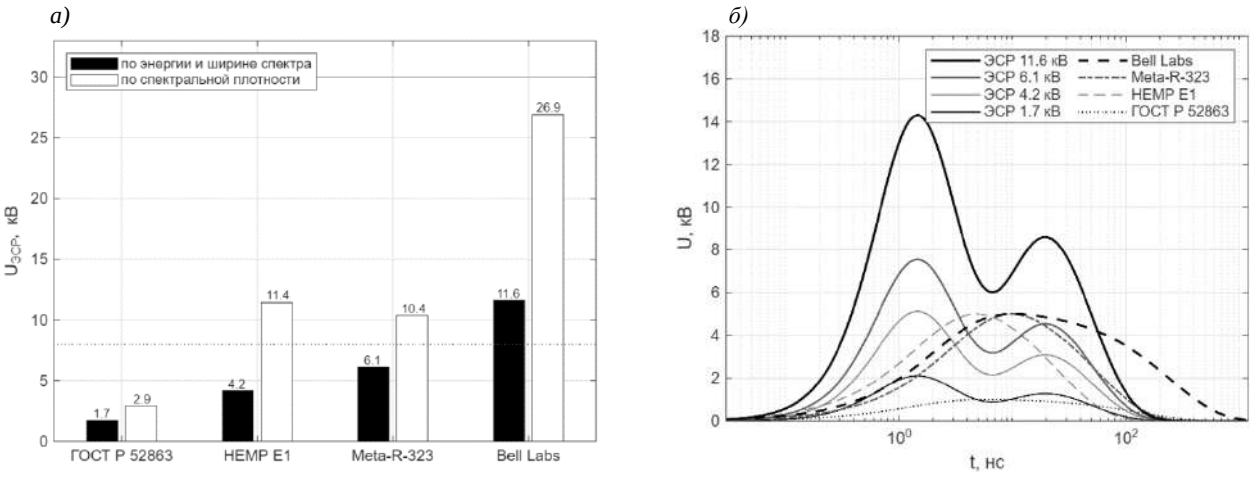


Рисунок 1 – Эквивалентное напряжение ЭСР (*а*); исследуемые импульсы (*б*)

Таблица 1 – **Эквивалентное испытательное напряжение ЭСР**

Импульс	$U_{ЭСР}$, кВ	$U_{ЭСР}$ (дополнительное условие), кВ
Meta-R-323	6,1	10,4
ГОСТ Р 52863	1,7	2,9
HEMP E1	4,2	11,4
Bell Labs	11,6	26,9

На рисунке 2 приведены спектры импульсов. При дополнительном условии спектр импульса ЭСР не ниже спектров сравниваемых импульсов на частотах до 1 ГГц.

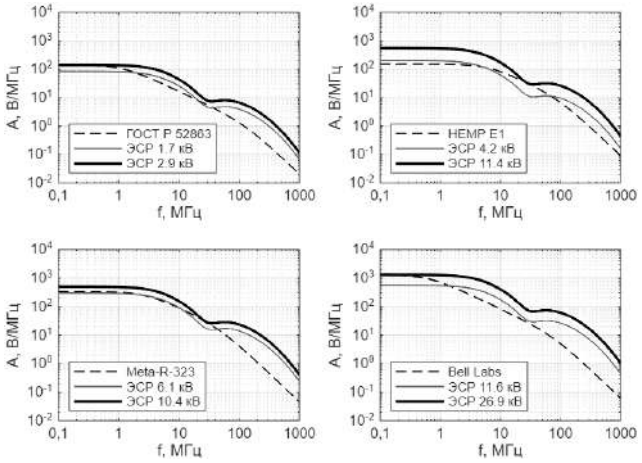


Рисунок 2 – Амплитудные спектры импульсов

Требуемое напряжение ЭСР пропорционально амплитуде других импульсов, поэтому по уровню, который выдержала аппаратура, можно оценить ее устойчивость к ЭИПВ. Например, при контактном разряде 8 кВ по основному условию это импульс Meta-R-323 до 6,5 кВ, импульс поля по ГОСТ Р 52863 до 47 кВ/м, импульс HEMP E1 до 96 кВ/м и импульс Bell Labs до 34 кВ/м; по дополнительному условию – 3,9 кВ, 27 кВ/м, 35 кВ/м и 15 кВ/м соответственно.

Таким образом, с учетом принятых ограничений можно использовать результаты испытаний на ЭСР для оценки устойчивости МСЖАТ к ЭИПВ.

Список литературы

1 **Комнатный, Д. В.** Метод косвенной оценки устойчивости микроэлектронных и микропроцессорных систем к электромагнитным импульсам преднамеренного воздействия / Д. В. Комнатный // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа, Гомель, 16–17 нояб. 2023 г. : 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 220–222. – EDN FBAJDZ.

2 **Бочков, К. А.** Методы анализа воздействия наносекундных импульсов помех преднамеренного воздействия на микроэлектронные системы железнодорожной автоматики и телемеханики / К. А. Бочков, И. О. Жигалин, Д. В. Комнатный // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа, Гомель, 16–17 нояб. 2023 г. : в 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 198–200.

3 **Жигалин, И. О.** Параметрическая оптимизация биэкспоненциальной модели импульса электростатического разряда на основе критериев эквивалентности / И. О. Жигалин, Д. Д. Медведев, Е. В. Яцушко // Интеллектуальные транспортные системы : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 21 мая 2026 г. – М. : Российский университет транспорта (МИИТ), 2026. – С. 550–555.

4 IEC 61000-4-2:2025. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-2. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к электростатическому разряду. – Взамен ГОСТ 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2:2008). – 163 с.

5 **Camp, M.** Parameter estimation of double exponential pulses (EMP, UWB) with least squares and Nelder Mead algorithm / M. Camp, H. Garbe // IEEE Trans. on EMC. – 2004. – Vol. 46, № 4. – P. 675–678.

6 **Radasky, W.** Intentional electromagnetic interference (IEMI) and its impact on the U.S. power grid : Meta-R-323 / W. Radasky, E. Savage. – Goleta : Metatech Corporation, 2010.

7 ГОСТ Р 52863-2007. Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям. Общие требования. – Введ. 27.12.2007. – М. : Стандартинформ, 2020. – 35 с.

8 IEC 61000-2-9:2025. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 2-9. Условия окружающей среды. Описание электромагнитного импульса при высотных (ядерных) взрывах (HEMP). Испускаемые помехи. – Введ. 14.05.2025. – 41 с.

9 **Giri, D. V.** High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) risetime evolution of technology and standards exclusively for E1 environment / D. V. Giri, W. D. Prather // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2013. – Vol. 55, № 3. – P. 484–491.

УДК 681.3.06:656.2

РАСПОЗНАВАНИЕ МАРКИРОВКИ ВАГОНОВ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОМЕХ МЕТОДОМ НЕЙРОИММУННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

А. В. КАЛАЧ, Е. А. САВВИНА, В. М. ВАСЕЧКИН

Воронежский государственный университет инженерных технологий, Российская Федерация

Оперативное управление составом – формирование поездов, учёт вагонов на станциях и подъездных путях, контроль погрузки – требует достоверного списка вагонов с их номерами. При руч-

ной сверке основным источником ошибок и потерь времени остаётся человек [1, с. 419], поэтому внедряются системы технического зрения (ARSCIS, «Транзит-Инспектор», «КАУ-В» и др.), верно распознающие 90–95 % номеров [1, с. 419–420]; остальные проверяет оператор.

Цифры номера нанесены трафаретом на неровную поверхность с рёбрами жёсткости и загрязнены [1, с. 419; 2, с. 56], однако номер избыточен: одна из восьми цифр контрольная, а при замедленном движении номер попадает в серию из 7–10 кадров [2, с. 56]. Для классификации цифр применяют сравнение с эталонами, нечёткий вывод и нейронные сети, дающие около 99 % верных символов при сложной реализации [3, с. 25].

Искусственные иммунные системы представляют решения популяцией антител с функцией аффинности и применяются в распознавании образов, в том числе вместе с нейронными сетями [4, с. 62–64, 69]; так, комплексирование нейронных и иммунных классификаторов повысило показатели обнаружения сетевых атак на 3,85–3,96 % [5, с. 74–75].

Целью работы является построение модели нейроиммунного классификатора цифр номера вагона и оценка доли вагонов, идентифицируемых без участия оператора.

Номер $n = (d_1, \ldots, d_8)$ содержит контрольный разряд, дополняющий до числа, кратного 10, сумму цифр произведений семи разрядов на чередующиеся веса 2 и 1:

$$S = \sum_{i=1}^{7} q(k_i d_i), \tag{1}$$

где $k_i = 2$ при нечётном i и $k_i = 1$ при чётном; $q(\cdot)$ – сумма цифр числа; любая одиночная ошибка в цифре нарушает равенство (1).

Изображение цифры $x \in R^m$ (антиген) классифицируется популяцией антител двух типов. Нейросетевое антитело j – многослойный перцептрон с весами θ_j, оценивающий вероятности классов $p_j(k \mid x; \theta_j)$; его аффинность к N антигенам (x_t, y_t) с известными метками. Логарифм правдоподобия верного класса строится по формуле

$$f_j = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N} \ln p_j(y_t \mid x_t; \theta_j). \tag{2}$$

Антитело ранга i по нормированной аффинности $f^*_j \in [0{,}1; 1]$ порождает N_c клонов, гипермутация которых ослабевает с ростом аффинности родителя [4, 6]:

$$N_c(i) = \operatorname{round}\left(\frac{\beta}{i}\right); \ \alpha_j = \exp(-\rho f^*_j), \tag{3}$$

где β – коэффициент клонирования; ξ – стандартный нормальный вектор; σ_θ – разброс весов слоя; ε, ρ – параметры.

Клон дообучается (созревание аффинности), после чего антитело, совпадающее по решениям с более сильным в доле случаев s_0, удаляется (сетевое подавление); в памяти остаются M лучших антител.

Антитела второго типа – клетки иммунной памяти c_l с метками y_l в пространстве изображений с аффинностью

$$\operatorname{aff}(x, c_l) = \exp\left(-\frac{\| x - c_l \|^2}{2\sigma^2}\right), \tag{4}$$

обучаемые аналогичным клональным отбором; оценка $P_I(k \mid x)$ пропорциональна суммарной аффинности K ближайших клеток класса k, что соответствует классификации по ближайшему соседу в моделях положительного отбора [4]. Решение объединяет оба типа антител:

$$\ln P(k \mid x) = \lambda \sum_{j=1}^{M} w_j \ln p_j(k \mid x) + (1 - \lambda) \ln P_I(k \mid x) - \ln Z(x), \tag{5}$$

где w_j – вес нейросетевой части; $Z(x)$ – нормирующий множитель. Номер выбирается как наиболее правдоподобная допустимая комбинация цифр по T кадрам:

$$n^* = \arg \max \sum_{\tau=1}^{T} \sum_{i=1}^{8} \ln P_\tau(d_i \mid x_{i\tau}), \tag{6}$$

где Ω – номера, удовлетворяющие (1); если два лучших номера различаются по логарифму правдоподобия меньше, чем на δ, номер передаётся оператору. Суточная трудоёмкость ручной обработки

$$T_{\text{оп}} = N_{\text{в}}(1 - P_{\text{а}})t_{\text{р}}, \tag{7}$$

где $N_{\text{в}}$ – число вагонов в сутки; $P_{\text{а}}$ – доля номеров, считанных автоматически и верно; $t_{\text{р}}$ – время проверки одного номера.

Модель проверялась на синтетической выборке: цифры 28×20 пикселей шести рубленых шрифтов (один не участвовал в обучении) с поворотом, наклоном, размытием, снижением контраста, пятнами грязи, отслоением краски и шумом, интенсивность которых задавалась уровнем помех $s \in [0; 1]$. Сравнивались корреляционный эталон, перцептрон со скрытыми слоями 128 и 48 нейронов, иммунная память, комитет нейросетевых антител и гибрид (5).

В диапазоне обучения все методы, кроме корреляционного эталона, распознают цифры с точностью не ниже 89 % (рисунок 2, *а*). При s от 0,4 до 0,7 гибрид точнее остальных (при s = 0,7 89,5 % против 83,6 % у перцептрона), при $s \geq 0{,}4$ он ошибается в 1,5–1,7 раза реже перцептрона, а при $s \geq 0{,}8$ – близок к иммунной памяти, которая на уровне s = 1,0 точнее (73,9 % против 72,3 %). Ошибка иммунной памяти на валидационной выборке за 20 поколений отбора снизилась с 5,6 до 1,5–2,0 %, однако выросло время классификации символа.

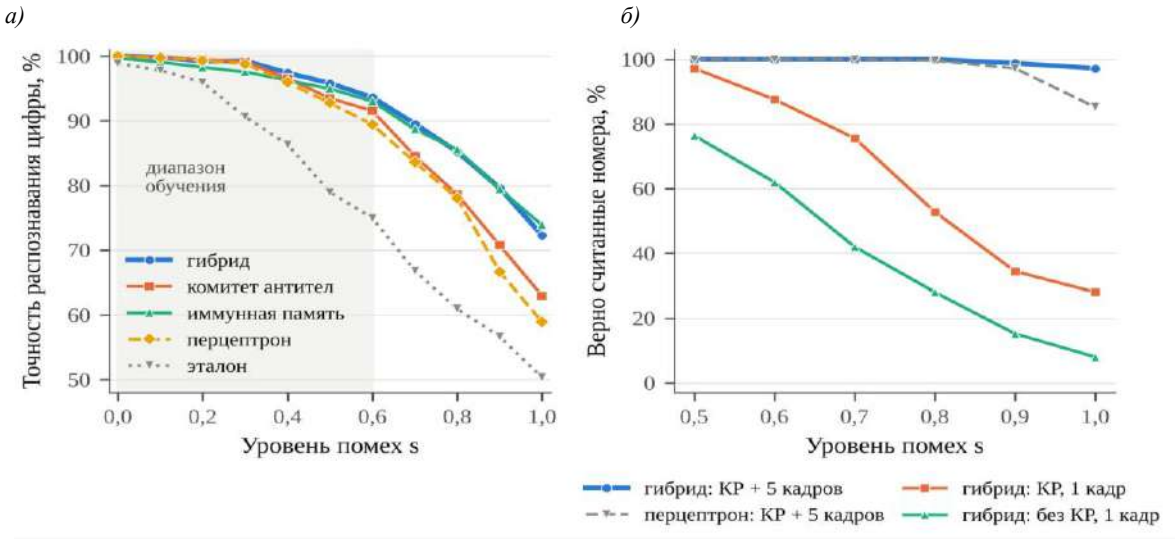


Рисунок 2 – Точность распознавания цифр (*а*) и доля верно считанных номеров (*б*);
гибрид – классификатор (5), КР – контрольный разряд

Таким образом, нейроиммунная модель с декодированием по контрольному разряду и нескольким кадрам обеспечила автоматическую идентификацию более 97 % вагонов там, где посимвольное считывание даёт менее 10 % верных номеров, а гибридный классификатор превзошёл перцептрон и комитет нейросетей при всех уровнях помех выше 0,3. Для управления составом это означает меньший объём ручной проверки; ограничения работы – синтетическая выборка и отсутствие моделирования локализации номера, поэтому следующий шаг – проверка на видеозаписях реальных составов.

Список литературы

1 **Казанский, Н. Л.** Распределённая система технического зрения регистрации железнодорожных составов / Н. Л. Казанский, С. Б. Попов // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 3. – С. 419–428.

2 **Губайдуллина, А. А.** Идентификация вагонов подвижного состава железнодорожного транспорта / А. А. Губайдуллина // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2015) : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Самара, 28–30 апр. 2015 г. Т. 2 / под ред. С. А. Прохорова. – Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2015. – С. 55–57.

3 **Смирнов, А. Е.** Метод распознавания номера вагона с помощью механизма нечеткого вывода / А. Е. Смирнов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2007. – Вып. 22. – С. 24–27.

4 **Скобцов, Ю. А.** Современные иммунологические модели и их приложения / Ю. А. Скобцов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение. – 2022. – № 3 (140). – С. 61–77.

5 **Браницкий, А. А.** Обнаружение сетевых атак на основе комплексирования нейронных, иммунных и нейронечетких классификаторов / А. А. Браницкий, И. В. Котенко // Информационно-управляющие системы. – 2015. – № 4. – С. 69–77.

УДК 656.25

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ РЕАЛИЗАЦИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ КОМАНД НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЯХ

В. В. КАМЕНСКИЙ
Ростовский государственный университет путей сообщения,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Промышленность, сельское хозяйство и энергетика являются основой экономики любого государства. Но кроме этого, для обеспечения предприятий ресурсами, а населения товарами необходима еще система транспортировки грузов и перевозки пассажиров. Железнодорожный транспорт занимает лидирующие позиции по объему перевозимых грузов и количеству пассажиров.

Четкая работа железнодорожного транспорта обеспечивается многоуровневыми системами автоматизации от региональных центров управления до линейных станций.

Из региональных центров управления с помощью систем диспетчерской централизации осуществляется передача команд управления движением поездов в микропроцессорные системы централизации на линейных станциях. Микропроцессорные системы централизации (МПЦ) осуществляют управление напольными устройствами (стрелками и светофорами) и обеспечивают безопасность движения поездов на станциях.

Современные системы централизации построены с применением резервирования и обеспечивают высокие показатели надежности. Вместе с тем, напольные устройства рельсовые цепи, стрелки и светофоры эксплуатируются в самых жестких условиях по воздействию климатических, механических и электромагнитных воздействий.

Отказы напольных устройств и систем микропроцессорной централизации приводят к необходимости использования ответственных команд. В этом режиме команды диспетчерской централизации не проверяются на безопасность микропроцессорной централизацией на станциях. Безопасность движения поездов в этом случае обеспечивается устройствами диспетчерской централизации [1, 2].

В диспетчерской централизации ДЦ-ЮГ с РКП [3–5] при формировании, передаче и реализации ответственных команд (ОТУ) используются следующие принципы:

1 В формировании ответственных команд участвуют два агента службы движения: поездной диспетчер ДНЦ и старший поездной диспетчер ДНЦС, каждый из которых осуществляет формирование ответственной команды на своем автоматизированном рабочем месте (АРМ).

2 Реализация ответственной команды состоит из этапов: передача предварительной команды, анализ квитанции на предварительную команду, передача рабочей команды.

3 Команда с пункта управления на контролируемый пункт передается по двум независимым каналам. Прием ответственных команд осуществляется двумя разными комплектами.

4 Первый и второй комплекты должны передать первую и вторую части ответственной команды в микропроцессорную централизацию.

На контролируемом пункте один из комплектов находится в активном состоянии, а другой – в пассивном состоянии. Активный комплект ведет опрос блоков телесигнализации и передает команды в блоки телеуправления. Работа активного комплекта при выполнении команды ОТУ состоит из следующих этапов:

1 Ожидается получение ответственной команды.

2 Осуществляется передача запроса в соседний, пассивный комплект.

3 Производится анализ ответов.

Если ответ не поступил в течение времени ожидания (таймаута), например сообщение было искажено, то производится выдержка времени t и осуществляется повторная передача запроса.

Если получен ответ «Команда ОТУ не получена пассивным комплектом», то производится выдержка времени t и производится повторная передача запроса.

Если получен ответ «Команда принятая активным и пассивным комплектом не совпала», то выполнение команды прекращается.

Если получен ответ «Команда совпадает», осуществляется шифрование команды ключом доступа соответствующего комплекта.

4 Осуществляется передача первой и второй частей команд в блоки МПЦ.

5 Активный комплект осуществляет периодические запросы в МПЦ с целью получения квитанции от микропроцессорной централизации на предварительную команду ОТУ.

6 В зависимости от полученной квитанции осуществляются следующие действия:

Если получена квитанция «Команда отвергнута», выполнение ответственной команды прекращается.

Если получена квитанция «Команда принята», запросы с целью получения квитанции продолжаются.

Если получена квитанция «Команда выполнена», запросы с целью получения квитанции прекращаются и квитанция передается на пункт управления.

При выполнении команды ОТУ пассивный комплект осуществляет следующие действия:

1 Ожидает получение ответственной команды.

2 Ожидает получение запроса от соседнего комплекта на выполнение ответственной команды.

3 Производит анализ запроса.

Если запрос не поступил в течение времени ожидания (таймаута), то выполнение ответственной команды прекращается.

Если в полученном запросе ответственная команда не совпадает с командой, полученной с пункта управления, то выполнение ответственной команды прекращается.

Если в полученном запросе ответственная команда совпадает с командой, полученной с пункта управления, то осуществляется шифрование команды ключом доступа соответствующего комплекта.

Активный комплект проверяет квитанцию и в случае успешной реализации предварительной команды передает квитанцию на пункт управления. Поездной диспетчер, получив квитанцию на предварительную команду, передает рабочую команду.

Работа активного и пассивного комплектов повторяется, но в этот раз добавляются следующие проверки:

1 Перед выполнением рабочей команды проверяется интервал времени, прошедший с момента получения предварительной команды, он не должен превышать 20 с.

2 Счетчики ответственных команд в сообщении предварительной и рабочей команды должны совпадать.

3 Рабочая команда дополнительно кодируется данными из квитанции на предварительную команду.

Таким образом, использование цифрового интерфейса позволяет, не ухудшая характеристик безопасности, исключить использование дополнительных электромагнитных реле при реализации интерфейса между диспетчерской централизацией и микропроцессорной централизацией, а также значительно расширить набор ответственных команд управления на станциях.

Список литературы

1 ГОСТ 33896-2016. Системы диспетчерской централизации и диспетчерского контроля движения поездов. – Введ. 01.11.2017. – М. : Стандартинформ, 2017. – 12 с.

2 СТО РЖД 1.19.003-2010. Автоматизированные системы диспетчерского управления движением поездов. – Введ. 01.06.2010. – ОАО «РЖД», 2010. – 41 с.

3 Система диспетчерского контроля и управления движением поездов «ДЦ-ЮГ с РКП» : монография / И. Д. Долгий, А. Г. Кулькин, Ю. Э. Пономарев [и др.] ; под общ. ред. проф. И. Д. Долгого и канд. техн. наук А. Г. Кулькина. – Ростов н/Д : РГУПС, 2010. – 468 с

4 **Каменский, В. В.** Совершенствование протокола передачи данных между микропроцессорными системами централизации стрелок и сигналов и диспетчерской централизации на крупных железнодорожных станциях / В. В. Каменский, В. В. Кудюкин, О. И. Соколова // Транспорт: наука, образование, производство : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Ростов н/Д : РГУПС, 2023. – С. 86–89.

5 **Каменский, В. В.** Использование многомерной матрицы при реализации ответственных команд в системах автоматики на железнодорожных станциях / В. В. Каменский // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. пятилетке качества, Гомель, 20–21 нояб. 2025 г. : в 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2025. – С. 159–161.

УДК 621.396:621.391.82

РАСЧЕТ ЭКРАНИРОВАННЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д. В. КОМНАТНЫЙ
Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

При разработке аппаратуры современных микроэлектронных и микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики возникают новые проблемы электромагнитной совместимости. Необходимо обеспечить помехозащищенность узлов этой аппаратуры, что достигается использованием экранированных печатных плат. В этих платах каждая линия связи экранирована прямоугольным металлическим экраном [1, 2]. Вместе с тем требуется исключить возникновение помех в линиях связи таких плат. Для решения этой задачи требуется анализ распространения сигналов по линиям связи путем решения уравнений идеальной длинной линии. Расчет первичных параметров такой линии, от которых зависят коэффициенты уравнения линии, осуществляется путем определения погонной емкости проводников линий связи методами электростатики.

Так как конструкция платы является сложной электродинамической системой, расчет поля в ней выполняется численными методами. Среди численных методов в трудах Л. Н. Кечиева [1, 3] наиболее разработан метод граничных элементов. Он основан на численном решении интегрального уравнения для электростатического поля в печатной плате:

$$u(x,y)=\int_S G\left(x_M,x_Q,y_M,y_Q\right)\sigma\left(x_Q,y_Q\right)dxdy, \tag{1}$$

где u – потенциал, В; x, y – координаты точки наблюдения M и точки влияния Q, м; G – функция Грина задачи; σ – плотность электрического заряда, Кл/м.

Для численного решения интегрального уравнения (1) границы проводников линии связи разделяются на граничные элементы. Предполагается, что плотность заряда элемента постоянная. Тогда интегральное уравнение (1) сводится к системе алгебраических линейных уравнений вида

$$u(x,y)=\sum_{i=i}^{N}\sum_{j=1}\sigma\left(x_Q,y_Q\right)\int_o^{d_j} G\left(x_M,x_Q,y_M,y_Q\right)dxdy\,, \tag{2}$$

где i, j– счетные переменные; N – число граничных элементов; d_j – длина граничного элемента j, м.

Функция Грина для рассматриваемой электродинамической системы известна [4] и имеет вид

$$G\left(x_M,x_Q,y_M,y_Q\right)=\frac{1}{\pi^2 wh\varepsilon_a}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin\left(\frac{n\pi x_M}{w}\right)\sin\left(\frac{m\pi x_Q}{w}\right)}{\left(\frac{m}{w}\right)^2+\left(\frac{n}{w}\right)^2}\sin\left(\frac{n\pi y_M}{h}\right)\sin\left(\frac{m\pi y_Q}{h}\right), \tag{3}$$

где ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика платы, Ф/м; n, m – счетные переменные функции Грина; w – длина экрана, м; h – высота экрана, м.

Линия связи может располагаться параллельно горизонтальной стенке экрана или параллельно его вертикальной стенке. В первом случае точка влияния имеет координаты $x_Q \in \left(x_{нj}, x_{кj}\right)$, $y_Q = y_{нj}$. Во втором случае координаты точки влияния $y_Q \in \left(y_{нj}, y_{кj}\right)$, $x_Q = x_{нj}$, где $x_{нj}$, $y_{нj}$ – координаты начала граничного элемента, м; $x_{кj}$, $y_{кj}$ – координаты конца граничного элемента, м.

Тогда для горизонтального расположения линии связи линейные алгебраические уравнения системы (2) приобретают вид

$$u(x,y)=\sum_{i\,=\,i}^{N}\sum_{j\,=\,1}\sigma\left(x_Q,y_Q\right)\int_{x_{нj}}^{x_{кj}} G\left(x_M,x_Q,y_M,y_Q\right)dx_Q. \tag{4}$$

Для вертикального расположения линии связи линейные алгебраические уравнения системы (2) приобретают вид

$$u(x,y)=\sum_{i=i}^{N}\sum_{j=1}\sigma(x_Q,y_Q)\int_{y_{нj}}^{y_{кj}}G(x_M,x_Q,y_M,y_Q)\,dy_Q. \qquad (5)$$

Из (3) и (4) следует, что в этом случае интегрирование функции Грина сводится к следующему:

$$\int_{x_{нj}}^{x_{кj}}\frac{\sin\left(\frac{n\pi x_M}{w}\right)\sin\left(\frac{m\pi x_Q}{w}\right)}{\left(\frac{m}{w}\right)^2+\left(\frac{n}{w}\right)^2}\sin\left(\frac{n\pi y_M}{h}\right)\sin\left(\frac{m\pi y_Q}{h}\right)dx_Q=\frac{\sin\left(\frac{n\pi x_M}{w}\right)\sin\left(\frac{n\pi y_M}{h}\right)\sin\left(\frac{m\pi y_Q}{h}\right)}{\left(\frac{m}{w}\right)^2+\left(\frac{n}{w}\right)^2}\times$$

$$\times\frac{w}{m\pi}\left[\cos\left(\frac{m\pi x_{нj}}{w}\right)-\cos\left(\frac{m\pi x_{кj}}{w}\right)\right]. \qquad (6)$$

Аналогично из (3) и (5) получается, что интегрирование функции Грина

$$\int_{y_{нj}}^{y_{кj}}\frac{\sin\left(\frac{n\pi x_M}{w}\right)\sin\left(\frac{m\pi x_Q}{w}\right)}{\left(\frac{m}{w}\right)^2+\left(\frac{n}{w}\right)^2}\sin\left(\frac{n\pi y_M}{h}\right)\sin\left(\frac{m\pi y_Q}{h}\right)dy_Q=\frac{\sin\left(\frac{n\pi x_M}{w}\right)\sin\left(\frac{m\pi x_Q}{w}\right)\sin\left(\frac{n\pi y_M}{h}\right)}{\left(\frac{m}{w}\right)^2+\left(\frac{n}{w}\right)^2}\times$$

$$\times\frac{h}{m\pi}\left[\cos\left(\frac{m\pi y_{нj}}{h}\right)-\cos\left(\frac{m\pi y_{кj}}{h}\right)\right]. \qquad (7)$$

Внедиагональные элементы матрицы коэффициентов уравнений (4) и (5) связывают потенциал в точке наблюдения M с плотностью электрического заряда в точке влияния Q, которые принадлежат разным граничным элементам. Диагональные элементы связывают потенциал в точке наблюдения с зарядом, распределенным по граничному элементу, к которому эта точка принадлежит. При вычислении диагонального элемента для горизонтальной линии $x_M=\frac{x_{кj}+x_{нj}}{2}$, $y_M=y_{нj}$. При вычислении диагонального элемента для вертикальной линии $y_M=\frac{y_{нj}+y_{кj}}{2}$, $x_M=x_{нj}$. Очевидно, что подстановка этих значений в (6) и (7) соответственно не приводит к исключениям. При этом для расчета диагональных элементов матрицы коэффициентов нет необходимости вводить в рассмотрение локальные системы координат, связанные с граничным элементом.

Системы линейных алгебраических уравнений (4) и (5) относительно неизвестных плотностей электрических зарядов граничных элементов могут быть составлены с достаточной для практики точностью при удержании до 25 слагаемых в функции Грина (3).

При расчете экранированной печатной платы методом граничных элементов не возникают исключения. Диагональные и внедиагональные элементы матрицы коэффициентов системы линейных алгебраических уравнений вычисляются по одинаковым формулам. При этом существуют аналитические выражения для необходимых интегралов. Численное интегрирование не требуется. Это облегчает составление программ для реализации метода граничных элементов на компьютере.

Функция Грина задачи получена так, что в ней учитываются электрические заряды, индуцированные на металлических экранах платы. Следовательно, не требуется вводить на этих экранах сетку граничных элементов, что сокращает размерность задачи.

Недостатком рассматриваемого в докладе метода является необходимость вычисления сумм громоздких выражений в (4) и (5). Но этот недостаток компенсируется указанными выше достоинствами, сокращающими вычислительную сложность метода.

Поэтому можно сделать общий вывод по докладу. Применение экранированных печатных плат в конструкциях аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики повышает помехозащи-

щенность узлов этой аппаратуры к внешним и внутриаппартурным электромагнитным помехам. Исключение помех в линиях связи таких плат при проектировании является исследованной задачей и может быть достигнуто. Метод граничных элементов позволяет рассчитать первичные параметры линий связи, при этом вычислительные трудности сравнительно ниже, чем при расчете линий связи печатных плат других конструкций. Следовательно, экранированные печатные платы являются предпочтительными в конструкциях аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики. Их проектирование не вызывает принципиальных затруднений и может быть осуществлено на практике без неприемлемых затрат труда и времени.

Список литературы

1 **Кечиев, Л. Н.** Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л. Н. Кечиев. – М. : Группа ИДТ, 2007. – 616 с.

2 **Белоус, А. И.** Защита от электромагнитных излучений: материалы, технологии, конструкции / А. И. Белоус. – М. : Вологда : Инфра-инженерия, 2026. – 424 с.

3 **Кечиев, Л. Н.** Расчет электрической емкости в конструкциях РЭС / Л. Н. Кечиев, И. В. Цырин. – М. : Московский институт электронного машиностроения, 1990. – 96 с.

4 **Xiang, Yumin.** Electrostatic force on the rectangular wall of a strip transmission line / Yumin Xiang // Journal of Chongqing University – 2002. – Vol. 1, № 2. – P. 72–74.

УДК 621.316.97+621.319.7

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРА ДЛЯ ЗАЩИТЫ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ СЖАТ ОТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

Д. В. КОМНАТНЫЙ

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

Электростатические разряды (ЭСР) являются широко распространенными, достаточно опасными и плохо выявляемыми источниками отказов и сбоев микроэлектронной аппаратуры. Современные микроэлектронные и микропроцессорные системы железнодорожной автоматики и телемеханики также подвержены действию ЭСР. Поскольку отказы и сбои систем управления движением поездов могут привести к недопустимому снижению уровня безопасности перевозочного процесса, то указанные системы нуждаются в защите от электростатических разрядов. Для защиты микроэлектронной аппаратуры от ЭСР в [1] предложены диэлектрические покрытия на проводящие стенки корпусов микроэлектронных технических средств. Принцип действия такого покрытия аналогичен принципу действия диэлектрических барьеров, которые применяются в технике высоких напряжений (ТВН).

Однако при анализе диэлектрических барьеров в ТВН и покрытия-барьера, защищающего от ЭСР, необходимо рассматривать значительно отличающиеся по конструкции электрические системы. В ТВН традиционно рассматривается система: прямой стержень – бесконечная проводящая плоскость с диэлектрическим покрытием. При рассмотрении защиты от ЭСР необходимо рассматривать разрядную систему, соответствующую процедуре натурных испытаний на устойчивость к ЭСР, которые обязательны для микроэлектронной аппаратуры по требованиям нормативно-технической документации. Поэтому на основании ГОСТ 30804.4.2-2013 разрядная система для анализа диэлектрического барьера от ЭСР должна состоять из проводящего конуса, имитирующего разрядный наконечник испытательного генератора при контактном разряде, и проводящей заземленной плоскости с диэлектрическим покрытием. Необходимо рассчитать характеристики электростатического поля в этой разрядной системе, особенно в диэлектрическом барьере. Барьер эффективен, если значение напряженности электростатического поля в барьере не превышает пробойного значения для диэлектрика, из которого изготовлен барьер.

Для расчета электростатического поля конуса известны аналитические методы, основанные на решении уравнения Лапласа в конических координатах [2, 3]. Но расчетные соотношения в этом случае сводятся к интегральному уравнению Фредгольма второго рода. Решение этого уравнения проводится численно. Поэтому для технических приложений более удобен численный метод гра-

ничных элементов, основанный на решении интегрального уравнения для неизвестного распределения плотности электрических зарядов по граничным поверхностям задачи.

В рассматриваемом случае имеются три граничные поверхности: поверхность конуса, граница раздела воздух – диэлектрик, граница раздела диэлектрик – металл. Две последние граничные поверхности при решении аналогичных задач принимаются бесконечными. Это обстоятельство усложняет формирование сетки граничных элементов и увеличивает размерность системы линейных алгебраических уравнений метода. Исключить необходимость размещения граничных элементов на бесконечных поверхностях позволяет метод электрических изображений в плоскости. Но малая толщина диэлектрического барьера и наличие двух границ раздела приводят к затруднениям при построении системы электрических изображений граничных элементов. Поэтому предлагается рассматривать проводящую плоскость как квадрат конечных размеров, значительно больших, чем радиус основания конуса, помещенный в диэлектрический полубесконечный слой. На поверхности квадрата вводится сетка граничных элементов. Тогда наличие плоской границы раздела воздух – диэлектрик просто учитывается по известному правилу электрических изображений.

Предполагается, что вершина конуса и точка пересечения диагоналей квадрата лежат на одной прямой, являющейся осью координат *Oz*. Тогда целесообразно рассматривать осесимметричное электростатическое поле и размещать на поверхности конуса и квадратного проводника круговые граничные элементы.

Интегральное уравнение для поверхностной плотности электрического заряда граничной поверхности

$$\int_{\Gamma}\int_{0}^{2\pi}\frac{\tau(Q)r(Q)d\varphi(Q)}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R_{MQ}}d\Gamma_Q = U\ ,$$

где Г – граничная поверхность; τ – линейная плотность электрического заряда, Кл/м; Q – точка влияния; M – точка наблюдения; ε – диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 – электрическая постоянная, Ф/м; φ – угловая координата, рад; R_{MQ} – расстояние между точкой влияния и точкой наблюдения, м; U – заданный потенциал граничной поверхности, В.

Интегральное уравнение сводится к системе линейных алгебраических уравнений

$$[u]=[A]\ [\tau],$$

где $[u]$ – квадратная матрица известных потенциалов граничных элементов; $[A]$ – квадратная матрица коэффициентов, связывающих линейную плотность заряда граничного элемента и потенциал электростатического поля элемента; [τ] – матрица-столбец неизвестных линейных плотностей зарядов граничных элементов.

Ключевым вопросом метода является формирование матрицы коэффициентов $[A]$ с учетом сингулярности соответствующих интегралов. В [4] предложен способ вычисления элементов матрицы коэффициентов, отличающийся простотой и удобством при программировании. В рассматриваемой задаче необходимо учесть электрические изображения граничных элементов в границе раздела диэлектриков, поэтому элементы матрицы записываются следующим образом.

Внедиагональный элемент для граничных элементов, находящихся в одной среде,

$$A_{ij} = \frac{r_j}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\left(G\left(z_i, z_j, r_i, r_j\right)+\lambda_{12}G\left(z_i, z_j^*, r_i, r_j\right)\right),$$

где i, j – счетные переменные; r – радиус граничного элемента, м; z – координата центра граничного элемента, м; z^* – координата центра электрического изображения граничного элемента.

Внедиагональный элемент для граничных элементов, находящихся в разных средах,

$$A_{ij} = \frac{r_j}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\gamma_{12}G\left(z_i, z_j, r_i, r_j\right).$$

Элемент матрицы, принадлежащий левой главной диагонали,

$$A_{ii} = \frac{L_i}{4\pi^2\varepsilon\varepsilon_0}\left(1+\frac{e_r^2L_i^2}{12r_i^2}-\ln\frac{L_i}{8r_i}\right)+\frac{r_i}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\lambda_{12}G\left(z_i, z_j^*, r_i, r_j\right),$$

где L – длина образующей граничного элемента, м; e_r – длина компонента орта координатной оси, совпадающей с образующей граничного элемента в локальной системе координат.

В приведенных выше формулах $G = \frac{K(m)}{\pi\sqrt{a+b}}$, $a = (z_i - z_j)^2 + r_i^2 + r_j^2$, $b = 2r_i r_j$, $m = \frac{2b}{a+b}$,

$K(m) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - m^2 \sin^2 \theta}}$ – полный эллиптический интеграл первого рода,

$\lambda_{12} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$ – коэффициент преломления; $\gamma_{12} = \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$ – коэффициент отражения.

На основании приведенных соотношений можно вывести формулы для расчета потенциала в контрольных точках и формулы для расчета характеристик поля в диэлектрическом барьере.

Таким образом, расчет диэлектрического барьера для защиты от ЭСР сводится к апробированному в [4] численному методу решения осесимметричных задач теории потенциала. Следовательно, простое и доступное средство защиты микроэлектронного оборудования от ЭСР может эффективно проектироваться современными компьютерными средствами. Что, в свою очередь, дает возможность существенно повысить помехоустойчивость современной микроэлектронной аппаратуры управления движением поездов, а также иными ответственными технологическими процессами.

Список литературы

1 **Ерин, Е.** Испытания на электростатическую устойчивость в производстве электроники / Е. Ерин, С. Филиппенко // Наноиндустрия. – 2015. – № 7. – С. 86–91.

2 **Лебедев, Н. Н.** Распределение электричества на тонком конечном конусе / Н. Н. Лебедев, И. П. Скальская // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1969. – № 6. – С. 1336–1346.

3 **Занадворов, Н. П.** Электростатическая задача для полого усеченного конуса / Н. П. Занадворов // Журнал технической физики. – 1987. – Т. 57, вып. 4. – С. 634–638.

4 **Пономарева, М. А.** Решение осесимметричных задач теории потенциала / М. А. Пономарева, Е. А. Собко, В. А. Якутенок // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2015. – № 5. – С. 86–96.

УДК 656.257

НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ НА СТАНЦИИ ЧЕЛЯБИНСК-ГЛАВНЫЙ

К. И. КОРНИЕНКО, А. Е. ШАПЕКИН

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, г. Москва, Российская Федерация

Станция Челябинск-Главный выбрана пилотной для реализации проекта «Цифровая железнодорожная станция» (ЦЖС), так как к моменту его запуска она уже имела значительное количество внедренных систем автоматизации технологических процессов [1–10]. Сегодня общая структура ЦЖС включает в себя 10 инфраструктурных модулей, в том числе ПАК разработки АО «НИИАС», и 14 программных модулей. В состав инфраструктурных модулей входит весь возможный набор аппаратных средств: постовое, напольное, бортовое и носимое оборудование.

Для беспилотных систем (БС), например локомотивов с функцией автоматического движения и роботизированной системы отпуска автоматических тормозов и выявления трещин литых деталей тележек и колесных пар грузовых вагонов на станции, важным фактором для выполнения функционала является отслеживание местоположения. С этой целью широко применяются географические информационные и навигационные системы. Для повышения надежности работы беспилотные системы работают в условиях комплексирования информации от разных источников: ГНСС-приемника, датчика пути и скорости (измеряющего скорость вращения оси колесной тележки), лидарной одометрии (визуальное уточнение с сантиметровой погрешностью расстояний до инфраструктурных объектов) и др. Алгоритм слияния данных динамически перераспределяет веса датчиков, что позволяет обеспечить требуемую точность при штатном режиме работы. При кратковременных потерях связи со спутниками ГНСС (до 1–2 мин) инерциальный контур сохраняет навигацию в допустимых пределах без внешних коррекций.

Однако при длительной потере связи со спутниками ГНСС (более 5 мин) накапливается погрешность при движении (около 5 м на 1 км), что в условиях работы на станции может привести к нарушениям безопасности движения (например, из-за неправильного позиционирования возможно начало движение при открытии сигнала с соседнего пути). Поэтому для обеспечения требуемой точности и безопасности необходима периодическая коррекция по внешним абсолютным меткам, не зависящим от радиоэфира и внешних серверов.

Кроме того, общим недостатком глобальных навигационных систем является зависимость от условий использования. Практически невозможно определять местонахождение внутри зданий, в подвалах или тоннелях, уровень сигнала серьезно ухудшается под покровом листвы деревьев и даже при большой облачности. На прием сигналов ГНСС также влияют помехи от наземных источников.

В условиях влияния помех одноуровневая архитектура построения связи и навигации БС нежизнеспособна. Требуется переход к резервированию и архитектурной отказоустойчивости как систем связи, так и систем навигации.

RFID-метки широко применяются для идентификации товаров, грузов, людей, а также в системах контроля и управления доступом СКУД и др.

Принцип действия RFID-меток достаточно прост. Считыватель непрерывно генерирует радиоизлучение заданной частоты. Метка, попадая в зону действия считывателя, использует это излучение в качестве источника электропитания и передает на считыватель идентификационный код. В зависимости от типов RFID-меток расстояние взаимодействия может достигать до 100 м.

Самыми простыми являются пассивные RFID-метки без встроенных источников питания. Они работают непрерывно, не зависят от освещения, служат 10–15 лет, невосприимчивы к радиоподавлению. Именно эта совокупность факторов делает RFID-метки предпочтительным решением для организации навигационных систем.

RFID-навигация имеет широкое применение в мировой практике. Deutsche Bahn и Network Rail используют RFID в шпалах для точной локализации дефектов и инспекции (точность ±0,05 м). Indian Railways в системе Kavach применяет их для автоматического управления движением. Горнодобывающие компании Caterpillar (690+ автономных самосвалов) и Komatsu (1000+ машин) используют связку LiDAR SLAM + резервные радиоканалы с частотной перестройкой для навигации в карьерах без покрытия GPS.

В Российской Федерации также нашли применение RFID-системы. Например, АО «БЭТ» с 2019 г. производит выпуск шпал со встроенными RFID-метками, которые позволяют реализовывать электронный паспорт шпалы. Обычные шпалы можно оснастить RFID-метками с помощью фрезеровки на глубину около 5 мм, что исключает снижение ее срока службы. Для более устойчивой работы в самых ответственных зонах RFID-метки необходимо размещать через каждые 30–50 м.

Рассмотрим технологию RFID-навигации. БС движется по лидарной карте, при проезде рядом с меткой (расстояние <3 м) считыватель получает уникальный идентификатор. Система сверяет координаты из базы данных с расчетной позицией, вычисляет вектор ошибки и мгновенно сбрасывает дрейф в фильтре Калмана. Время обработки менее 10 мс. Точность после коррекции возвращается к ±0,05 м. Система обрабатывает исключения, например ложные срабатывания отфильтровываются по пикетажу, при расхождении более 0,5 м метка игнорируется.

Использование RFID-навигации является перспективным методом обеспечения работоспособности БС. Она менее подвержена влиянию искусственных помех в связи с малым расстоянием считывателя и метки. Кроме того, RFID-навигацию можно использовать в условиях, где невозможно применение навигации с помощью ГНСС, например в тоннелях, под мостами и др.

АО «НИИАС» в рамках реализации проекта «Цифровая железнодорожная станция» прорабатывает вопрос оборудования одного из парков станции RFID-метками для реализации по ним навигации БС.

Список литературы

1 Цифровая железнодорожная станция – от концепции к реальному внедрению / В. Е. Андреев, А. И. Долгий, В. В. Кудюкин [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 9. – С. 2–6. – DOI: 10.34649/AT.2023.9.9.001.

2 Кадры для Цифровой железнодорожной станции / С. Ю. Гришаев, В. В. Кудюкин, А. Е. Хатламаджиян, И. А. Ольгейзер // Автоматика, связь, информатика. – 2024. – № 5. – С. 29–32. – DOI: 10.62994/AT.2024.5.5.003.

3 Цифровая железнодорожная станция на стадии комплексных испытаний / А. Е. Хатламаджиян, В. А. Яковлев, А. Е. Шапекин [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2026. – № 3. – С. 8–12. – DOI: 10.62994/AT.2026.3.3.001.

4 **Мыльников, П. Д.** Цифровая модель пути как основа развития систем управления и безопасности подвижного состава / П. Д. Мыльников, Д. А. Якушев, В. Ф. Иванов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2024. – № 2 (66). – С. 24–32.

5 Навигация транспорта с использованием RFID-технологии / Н. В. Бышов, А. А. Симдянкин, И. А. Успенский, А. Х. Мусли // Организация и безопасность дорожного движения : материалы X Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию со дня рождения д-ра техн. наук, проф. Л. Г. Резника, Тюмень, 16 марта 2017 г. : в 2 т. Т. 1. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2017. – С. 17–23.

6 **Костроминов, А. М.** Анализ и повышение точности RFID-навигации в условиях метрополитена / А. М. Костроминов, Е. А. Стрекаловский, О. Н. Тюляндин // Транспорт Урала. – 2018. – № 4 (59). – С. 23–27. – DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-23-27.

7 **Шабельников, А. Н.** Концепция цифровой платформы на сортировочных станциях / А. Н. Шабельников, И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19, № 1 (92). – С. 60–73. – DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-1-60-73.

8 **Шабельников, А. Н.** Цифровизация сортировочного комплекса / А. Н. Шабельников, В. В. Дмитриев, И. А. Ольгейзер // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 1. – С. 19–22.

9 Роль цифровых технологий в развитии сортировочных станций / А. Н. Шабельников, И. А. Ольгейзер, В. В. Борисов, А. В. Суханов // Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 7. – С. 2–5. – DOI: 10.34649/AT.2020.7.7.001.

10 **Ольгейзер, И. А.** Применение систем технического зрения для повышения уровня полноты безопасности / И. А. Ольгейзер, К. И. Корниенко, С. Ю. Гришаев // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году качества, Гомель, 21–22 нояб. 2024 г. : в 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2024. – С. 227–229.

УДК 656.25

РАЗВИТИЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ УСТРОЙСТВ СЦБ НА БАЗЕ СИСТЕМЫ АДК-СЦБ

П. А. МАЛАНИН, Л. С. КУЩЕНКОВА
Нижегородский институт путей сообщения – филиал
Приволжского государственного университета путей сообщения,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Развитие средств автоматизации в хозяйстве сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) остаётся одним из ключевых направлений повышения безопасности и эффективности железнодорожных перевозок. За последние два десятилетия вектор развития сместился от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию «по состоянию», а сегодня – к предиктивной диагностике на базе алгоритмов машинного обучения и технологий искусственного интеллекта.

НПП «Югпромавтоматизация» (ЮГПА) решает задачи, поставленные Управлением автоматики и телемеханики ОАО «РЖД», по развитию измерительных средств и функциональных возможностей системы технического диагностирования и мониторинга АДК-СЦБ. Система представляет собой современный программно-аппаратный диагностический комплекс с многоуровневой системой централизации данных, обеспечивающий мониторинг состояния технических средств релейных и микропроцессорных систем на станциях и участках железных дорог.

Импортозамещение и технологический суверенитет

Одним из определяющих факторов развития системы АДК-СЦБ в последние годы стала программа импортозамещения. В рамках Сводной программы достижения технологического суверенитета холдинга «РЖД» предусмотрена локализация производства сложных технических систем, включая замену иностранной элементной базы на отечественную. Система АДК-СЦБ на сегодня выполнена преимущественно на комплектующих российского производства, что обеспечивает её независимость от поставок зарубежных компонентов.

Помимо аппаратной части, ведётся работа по импортозамещению программного обеспечения. С 1 января 2025 года государственным органам и предприятиям запрещено применять иностранное ПО на объектах критической информационной инфраструктуры, что актуализирует задачу перевода диагностических систем на отечественные программные платформы. Предприятие развивает линейку программных продуктов Visual SCADA, промышленный релиз которой с расширенными возможностями управления проектами был запланирован на лето 2026 года.

Основные направления развития

Работа предприятия сосредоточена на следующих направлениях:

– повышение качества автоматизированного контроля в процессе эксплуатации и сопровождения устройств СЦБ и микропроцессорных устройств (МПУ) систем ЖАТ;

– развитие измерительных средств для диагностирования и мониторинга устройств электрической централизации (ЭЦ), горочной автоматической централизации (ГАЦ) и перегонов;

– совершенствование технологии эксплуатации микропроцессорных комплексов на участках железных дорог;

– обеспечение бесперебойной и надёжной работы устройств СЦБ при соблюдении требований безопасности перевозочного процесса.

Трёхуровневая архитектура и подсистемы

Система АДК-СЦБ построена по трёхуровневой архитектуре: уровень линейных объектов, уровень дистанции и уровень дороги. На уровне линейных объектов размещаются серверы контроля и диагностирования (СКД ЛПД), промышленные компьютеры, подсистема измерения сопротивления изоляции (ИМСИ), подсистема контроля температурного режима (СКТР), серверы точного времени СТВ-ГЛОНАСС и блоки автоматики станционного и перегонного комплексов на основе измерительно-вычислительных комплексов ИВК-АДК и ИВК-ТДМ. На уровне дистанции развёрнуты контрольно-диагностические комплексы КДК-ШЧД и КДК-ШЧУ. На уровне дороги – оборудование дорожного диспетчерского центра ТДМ на основе серверов СКД ШД и центрального сервера. Важным технологическим достижением стало внедрение модулей ввода-вывода с расширенными функциями самодиагностики. Аналоговые измерительные каналы выполняют самодиагностику входных цепей, встроенных источников опорных напряжений и метрологических характеристик в условиях одной неисправности. Каналы дискретного ввода контролируют как свои входные цепи, так и обрыв внешнего монтажа или нагрузки. Это позволило увеличить период калибровки измерительных каналов до пяти лет и перейти к обслуживанию технических средств СТДМ по их фактическому состоянию.

Соответствие отраслевым стандартам

Проектирование системы АДК-СЦБ ведётся по утверждённым типовым материалам проектирования, разработанным НПП «Югпромавтоматизация» совместно с Петербургским государственным университетом путей сообщения (ПГУПС). На предприятии внедрена система менеджмента качества в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001-2015. В сентябре 2026 года опубликована новая редакция международного стандарта ISO 9001:2026, однако действующим российским национальным стандартом пока остаётся ГОСТ Р ИСО 9001-2015; переходный период составит ориентировочно три года.

Измерительные средства ИВК-АДК зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений, сертифицированы по утверждённому типу и допущены к применению на железнодорожном транспорте. Программное обеспечение АДК-СЦБ сертифицировано в Регистре сертификации на железнодорожном транспорте.

Техническое обслуживание и ремонт микропроцессорных устройств СЦБ регламентируются СТО РЖД 19.001-2021, который устанавливает основные требования к процессам ввода в эксплуатацию, ТО и ремонта МПУ ЖАТ.

Диагностирование и мониторинг устройств СЦБ на перегоне

Внедрение устройств ИВК-ТДМ на перегонах обеспечивает контроль и программную обработку дискретной и аналоговой информации:

– напряжений, токов, температуры, сопротивления изоляции, параметров кодов АЛСН – устройств СЦБ перегонов, числовой кодовой автоблокировки и автоблокировки с тональными рельсовыми цепями;

– информационного взаимодействия с системами ДЦ, МПЦ, РПЦ и ТДМ;

– диагностирования состояния устройств и обеспечения их мониторинга;

– автоматизации технического обслуживания устройств автоблокировки;

– формирования баз данных результатов технического диагностирования;

– передачи результатов контроля и диагностирования в системы ТДМ;

– информационного взаимодействия с АСУ-Ш-2 для контроля выполнения работ по ТО и автоматизации учёта отказов.

Система обеспечивает бесперебойный контроль работоспособности рельсовых цепей, позволяя оперативно выявлять признаки ложного освобождения или ложной занятости путей, сбои в цепях реле и другие проблемы, способные повлиять на безопасность движения.

Диагностирование и мониторинг состояния кабельных сетей

На основе подсистемы ИМСИ обеспечивается автоматизация контроля и диагностирования состояния сопротивления изоляции устройств ЖАТ на станциях. ИМСИ применяются в качестве измерителей сопротивления изоляции постоянному току как относительно «земли», так и между гальванически не связанными электрическими цепями устройств СЦБ – кабельными сетями рельсовых цепей, стрелок, светофоров, переездов, УКСПС, САУТ.

Подсистема обеспечивает обработку, протоколирование и архивирование состояния сопротивления изоляции с целью формирования модели состояния и последующей передачи информации на уровень дистанции и службы. Диагностирование по совокупности дискретных и аналоговых параметров позволяет выявить и локализовать понижение сопротивления изоляции в кабеле и монтаже конкретных устройств на момент срабатывания сигнализатора заземления.

Нейросетевые технологии и предиктивная аналитика

Одним из наиболее значимых современных факторов развития системы АДК-СЦБ стало внедрение алгоритмов искусственного интеллекта для анализа диагностической информации. НПП «Югпромавтоматизация» ведёт работу по интеграции решений ГК «ИМСАТ» по выявлению неисправностей напольных устройств ЖАТ нейросетевыми алгоритмами. Решения позволяют использовать алгоритмы нейросетевого анализа тока перевода стрелок для выявления характерных неисправностей стрелочного перевода.

Исследования в области свёрточных нейронных сетей показали, что диагностический кадр данных, формируемый стрелочным измерительным контроллером, может быть эффективно обработан для классификации предотказного состояния стрелочного перевода. Точность прогнозирования достигает 94 %. Рекуррентные нейросетевые классификаторы способны в автоматическом режиме по графику активной мощности определять состояние стрелки и предупреждать обслуживающий персонал о необходимости ремонта.

В более широком контексте предиктивная аналитика позволяет не только фиксировать текущее состояние оборудования, но и прогнозировать его поведение в перспективе. Алгоритмы машинного обучения выявляют малозаметные изменения параметров – колебания напряжения, снижение уровня изоляции, отклонения температурных режимов – и предупреждают о потенциальных отказах за несколько часов или дней до их возникновения. Внедрение предиктивной аналитики в рамках проекта «Цифровая железная дорога» уже позволило снизить потери от отказов инфраструктуры более чем на 50 % с кумулятивным эффектом 2,2 млрд рублей.

Развитие задач информатизации хозяйства СЦБ

Программно-аппаратные средства АДК-СЦБ служат для развития инфраструктуры и решения задач информатизации в хозяйстве СЦБ. При внедрении системы на станциях и перегонах и увязке с микропроцессорными системами ЖАТ:

– автоматизируется контроль, диагностирование и мониторинг устройств СЦБ и МПУ на станциях и перегонах;

– формируются данные логического контроля за действиями оперативного и обслуживающего персонала;

– централизуются результаты диагностирования на уровне диспетчеров дистанции и службы;

– оптимизируются программно-аппаратные средства систем при подключении к устройствам СЦБ;

– осуществляется информационное взаимодействие с АСУ-Ш-2 для контроля выполнения работ по ТО и автоматизации учёта отказов;

– внедряются малолюдные и ресурсосберегающие технологии, снижающие эксплуатационные расходы не только в хозяйстве СЦБ, но и в смежных хозяйствах.

В рамках проекта «Цифровая железная дорога» предусмотрена разработка диагностических контроллеров устройств ЖАТ на базе интернета вещей, а также технологии автоматической классификации выявляемых диагностических ситуаций на основе алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта.

Предприятие разработало и утвердило технические решения по увязке АДК-СЦБ с системами МПЦ Ebilock-950, ЭЦ-МПК, ДЦ-МПК, ДЦ «Сетунь», РПЦ «Диалог», ДЦ-Юг, АСДК, ГАЛС-Р. Разрабатываются технические решения увязки с системами МПЦ-МЗ-Ф, МПЦ-2, МПЦ-И, КСАУ-СП.

Изменение технологии обслуживания устройств СЦБ и МПУ

Разработан сборник технологических карт для автоматизации работ ТО устройств СЦБ в системе АДК-СЦБ, регламентирующий автоматизированное выполнение работ по технологическим картам и видам измерительных каналов согласно действующим инструкциям. Автоматизированная технология обслуживания (АТО) внедряется на многих объектах ЖАТ в дистанциях СЦБ Октябрьской, Северо-Кавказской и Юго-Восточной железных дорог.

Первый этап автоматизации охватывает автоматическое измерение параметров и ведение технической документации. Дальнейшее развитие предполагает переход к обслуживанию «по состоянию» – по результатам диагностирования и диагнозам системы. Поскольку АДК-СЦБ непрерывно контролирует параметры устройств СЦБ относительно установленных норм, работы по содержанию устройств можно производить не периодически, а по мере возникновения отклонений и принятия решения о необходимости ремонта или регулировки.

Внедрение предиктивной аналитики переводит обслуживание на принципиально новый уровень: алгоритмы машинного обучения анализируют динамику параметров, а не их статические значения, и обеспечивают более раннее и точное предупреждение отказов.

Контроль качества электроэнергии

В системе АДК-СЦБ измеряются и контролируются параметры, определяющие качество электроэнергии. С 1 ноября 2024 года введено в действие Изменение № 1 к ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», заменившее ранее действовавший ГОСТ 13109-97. Реализация полноформатного контроля качества электроэнергии в системе АДК-СЦБ позволит поднять на новый уровень взаимодействие служб автоматики и телемеханики со службой энергоснабжения.

Система АДК-СЦБ, развиваемая НПП «Югпромавтоматизация», представляет собой комплексное решение для автоматизации технического обслуживания устройств СЦБ и микропроцессорных систем ЖАТ. Последовательное расширение функциональных возможностей системы – от автоматического измерения параметров до предиктивной диагностики на базе нейросетевых алгоритмов – обеспечивает повышение безопасности движения, снижение эксплуатационных расходов и переход к ресурсосберегающим технологиям. Выполнение системы преимущественно на отечественной компонентной базе отвечает задачам технологического суверенитета, а интеграция с проектом «Цифровая железная дорога» открывает перспективы дальнейшего развития интеллектуальных систем управления инфраструктурой железнодорожного транспорта.

Список литературы

1 ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.07.2014. – М. : Стандартинформ, 2014. – 16 с.

2 СТО РЖД 19.001-2021. Средства железнодорожной автоматики и телемеханики. Порядок ввода в эксплуатацию, технического обслуживания и ремонта микропроцессорных устройств сигнализации, централизации и блокировки. – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 01.06.2021 № 1217/р. – 20 с.

3 **Богданов, Н. А.** Внедрение автоматизированной технологии контроля параметров устройств сигнализации, централизации и блокировки с применением систем технического диагностирования и мониторинга / Н. А. Богданов // КиберЛенинка. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-avtomatizirovannoy-tehnologii-kontrolya-parametrov-ustroystv-signalizatsii-tsentralizatsii-i-blokirovki-s-primeneniem (дата обращения: 11.09.2026).

4 **Канарский, В. А.** Сверточный нейросетевой классификатор состояния механизма стрелочного перевода / В. А. Канарский, А. И. Годяев // Информатика и системы управления. – 2024. – № 1 (79). – С. 36–45.

5 Интеллектуальные технологии в железнодорожной отрасли // Журнал НАРК. – 2025. – URL: https://journal.nark.ru/articles/spk/intellektualnye-tekhnologii-v-zheleznodorozhnoy-otrasli/ (дата обращения: 11.09.2026).

УДК 656.259.12:004.94

ТРЕБОВАНИЯ К ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ТОНАЛЬНОЙ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Д. Д. МЕДВЕДЕВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Цифровые модели (ЦМ) тональных рельсовых цепей (ТРЦ) применяются для анализа и расчета [1, 2]. Пока модель используется для исследования, ее погрешность влияет только на выводы исследователя. Если же по результатам моделирования устанавливаются параметры, от которых зависит выполнение функции контроля свободности участка, модель становится частью системы, связанной с безопасностью, и к ней должны предъявляться требования, соответствующие уровню полноты безопасности этой функции.

Стандарты функциональной безопасности классифицируют программные инструменты разработки по их влиянию на результат. По IEC 61508-3 [3] и EN 50716 [4] инструмент, выходные данные которого непосредственно или косвенно входят в исполняемый код или данные системы, относится к классу Т3. Эта классификация установлена для инструментов разработки программного обеспечения, однако по аналогии ее можно распространить на расчетную модель, результаты которой становятся данными настройки системы. Регулировочная таблица ТРЦ, рассчитанная по цифровой модели, является именно такими данными. По регулировочной таблице устанавливается напряжение генератора, от которого зависит корректное выполнение нормального и шунтового режима работы ТРЦ. Требования безопасности к системам железнодорожной автоматики и телемеханики на станциях и перегонах установлены ГОСТ 33894 [5] и ГОСТ 33895 [6], однако требований к расчетным моделям, по которым эти системы настраиваются, они не содержат. Цель работы – сформулировать такие требования на основе опыта построения и верификации цифровой модели ТРЦ.

Предлагаемые требования сведены в таблицу 1. Их основу составляют три принципа. **Первый** – исходные данные модели должны проверяться на физическую согласованность до их использования. **Второй** – модель должна проверяться по рабочему сигналу на величинах, не использованных при определении ее параметров. **Третий** – погрешность модели и разброс параметров аппаратуры должны быть оценены количественно и учтены в запасах.

Таблица 1 – **Требования к цифровой модели ТРЦ**

Требование	Способ выполнения и проверки
1 Определены решения, принимаемые по результатам модели, и класс инструмента	Перечень выходных данных (регулировочные таблицы, запасы режимов); для данных, определяющих настройку, – по аналогии класс Т3
2 Исходные данные физически согласованы	Проверка пассивности, повторяемости и соотношений между независимо измеренными величинами (например, |A| и коэффициент передачи холостого хода)
3 Модель проверена по рабочему сигналу	Сравнение с осциллограммами на выходе каждого элемента; разделение данных на используемые для определения параметров и для проверки
4 Погрешность модели и разброс параметров оценены количественно	Показатели погрешности по огибающей, амплитуде и фазе; статистическое моделирование разброса; учет в запасах нормального и шунтового режимов
5 Установлена область применимости	Диапазоны частот, уровней сигнала, температуры; для нелинейных элементов – зависимость параметров от уровня
6 Обеспечены управление конфигурацией и прослеживаемость	Версии модели, параметров элементов и измерений; связь каждого результата с исходными данными
7 Обеспечена независимость проверки	Проверка лицами или средствами, не участвовавшими в создании модели; выборочный контроль результатов измерениями на объекте

Опыт построения модели путевого фильтра ФПМ показывает, что эти требования выполнимы и не являются формальностью. Проверка соотношения между коэффициентом A четырехполюсника трансформатора и независимо измеренным коэффициентом передачи холостого хода позволила обнаружить ошибку в исходных данных короткого замыкания одного из выходов фильтра, которая без такой проверки перешла бы в модель. Условие взаимности $AD - BC = 1$ для этой цели непригодно, так как при расчете по опытам холостого хода и короткого замыкания оно выполняется тождественно. Зависимость индуктивности намагничивания трансформатора от уровня сигнала ограничивает область применимости линейной модели потому, что при уровне вдвое меньшем того, на котором определены ее параметры, линейная модель завышает амплитуду выходного напряжения фильтра более чем на 10 %. Наконец, методы, параметры которых определяются по тем же опытам, с которыми затем сравнивается модель, показывают малую погрешность, характеризующую качество описания, а не качество прогноза. Поэтому требование 3 таблицы 1 включает разделение данных.

Класс инструмента зависит от того, проверяются ли его выходные данные независимо. Если каждая рассчитанная регулировочная характеристика ТРЦ подтверждается измерением напряжений в контрольных точках для нормального и шунтового режима при вводе рельсовой цепи в эксплуатацию, ошибка модели будет обнаружена и роль модели сводится к поддержке проверки. Однако если расчетные значения применяются без такого контроля, например при переходе на другой тип аппаратуры или при проектировании, к модели по аналогии следует применять требования к ин-

струментам класса Т3. Требование 7 таблицы 1 введено именно для того, чтобы порядок применения модели был зафиксирован явно.

Количественная оценка разброса (требование 4, см. таблицу 1) существенна для шунтового режима. Статистическое моделирование ТРЦ с разбросом параметров аппаратуры в пределах допусков показывает, что при регулировке только по таблице 1 напряжение на приемнике в шунтовом режиме может превышать номинальное расчетное значение на 20 % и более, тогда как при установке напряжения генератора по фактическому напряжению на приемнике – не более чем на 5 %. Следовательно, требования к модели связаны с порядком ее применения.

Выполнение предложенных требований позволяет использовать цифровую модель ТРЦ как обоснованное средство расчета данных, влияющих на безопасность, а не только как инструмент исследования.

Список литературы

1 **Медведев, Д. Д.** Анализ искажений амплитудно-манипулированного сигнала контроля рельсовых линий / Д. Д. Медведев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2024. – № 1 (48). – С. 17–23.

2 **Mariscotti, A.** Modeling of audiofrequency track circuits for validation, tuning, and conducted interference prediction / A. Mariscotti, M. Ruscelli, M. Vanti // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2010. – Vol. 11, № 1. – P. 52–60.

3 IEC 61508-3:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Part 3: Software requirements. – Geneva : IEC, 2010. – 234 p.

4 EN 50716:2023. Railway applications – Requirements for software development. – Brussels : CENELEC, 2023. – 11 p.

5 ГОСТ 33894-2016. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных станциях. Требования безопасности и методы контроля. – Введ. 01.11.2017. – М. : Стандартинформ, 2017. – 30 с.

6 ГОСТ 33895-2016. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на перегонах железнодорожных линий. Требования безопасности и методы контроля. – Введ. 01.11.2017. – М. : Стандартинформ, 2017. – 12 с.

УДК 656.25+06

К ВОПРОСУ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИФРОВОГО ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО КОНТУРА В ТРАНСПОРТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Н. Р. ОСИПОВА, Н. А. РЕПЕШКО, А. О. КУДЕЛИНА
Ростовский государственный университет путей сообщения,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Анализ тенденций развития интеллектуальных систем управления и проблем взаимодействия человека и техники является актуальным трендом современных научных исследований. Так, в традиционной организационно-технической системе качество управления часто связывается с выполнением графика, отсутствием нарушений, использованием ресурсов и соблюдением технологических норм. В цифровой среде между объектом и субъектом управления появляется информационно-модельный слой: датчики, журналы событий, базы данных, алгоритмы, интерфейсы, каналы связи и цифровые регламенты. Поэтому актуальными становятся вопросы устойчивости цифрового человеко-машинного контура, от которого зависит безопасность транспортной системы в целом. Нормативная логика такого подхода подтверждается несколькими группами источников. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом до 2035 года закрепляет развитие транспортной системы как единого комплекса, в котором значимы безопасность, надежность, технологическое развитие и цифровизация [1]. Стратегическое направление цифровой трансформации транспортной отрасли до 2030 года фиксирует переход к цифровым сервисам, цифровому взаимодействию и проектам автономизации [2]. ГОСТ Р 59853-2021 определяет автоматизированный процесс как процесс, осуществляемый при совместном участии человека и средств автоматизации, а автоматизированную систему как систему, включающую комплекс средств автоматизации и персонал [3].

Устойчивость цифрового человеко-машинного контура должна оцениваться не только по состоянию транспортной инфраструктуры, но и по согласованности всего контура: объект – данные – цифровая модель – менеджер (оператор) – регламент – управляющее воздействие – обратная связь. Поэтому цифровой управляющий человеко-машинный контур транспортного производства предлагается рассматривать как замкнутую систему, в которой объект формирует поток параметров и событий, циф-

ровая среда преобразует их в формализованное состояние, менеджер (оператор) транспортной системы принимает или подтверждает решение, а регламентированное воздействие изменяет режим функционирования объекта (рисунок 1). Человек в такой системе не исключается из управления, а выступает субъектом ответственности, интерпретации, выбора и контроля последствий решения.

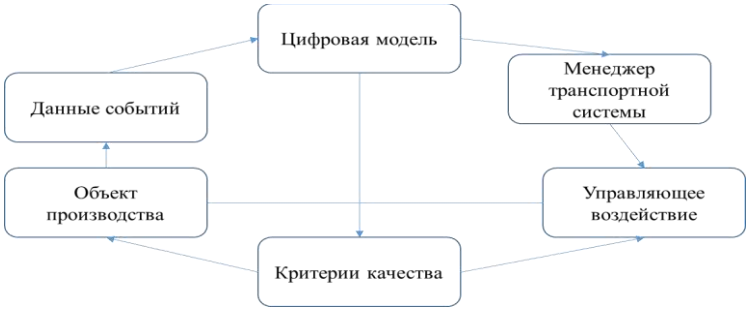


Рисунок 1 – Структура цифрового управляющего человеко-машинного контура

Для анализа устойчивости в теории управления применяются специальные критерии и коэффициенты, поэтому предлагается рассмотреть методический подход к формированию коэффициента устойчивости цифрового управляющего человеко-машинного контура транспортного производства. Коэффициент устойчивости не заменяет отраслевые показатели безопасности, надежности и производительности. Его назначение состоит в агрегировании разнотипных признаков цифрового управляющего контура. Поэтому показатель должен быть безразмерным, нормированным, интерпретируемым и пригодным для сравнения по периодам, объектам инфраструктуры, подразделениям и видам транспортного производства.

Базовая расчетная идея состоит в том, что устойчивость контура определяется пятью частными коэффициентами: технической готовности, цифровой состоятельности данных, субъектной готовности менеджера (оператора), регламентной исполнимости и непрерывности информационно-управляющего обмена. На железнодорожном производстве коэффициент может применяться для оценки диспетчерского контура в задачах управления станционной работой, локомотивным хозяйством, техническим обслуживанием инфраструктуры или грузовой работой при использовании автоматизированных и интеллектуальных систем. В автомобильном транспорте аналогичная логика применима к управлению парком транспортных средств или дорожной инфраструктурой. На водном транспорте показатель может характеризовать взаимодействие систем навигации, судов, служб порта [4]. В воздушном транспорте он применим к аэродромному, диспетчерскому или эксплуатационному управлению. Универсальность состоит не в одинаковом составе первичных параметров, а в единстве логики: готовность, данные, субъект, регламент, обмен и риск.

Коэффициент устойчивости может позволить обеспечить переход от перечня факторов к управленческой оценке. В этом проявляется связь критерия с предиктивной ответственностью: он заранее показывает, в каком звене контура возникает угроза потери качества управления.

Практическое внедрение коэффициента требует цифрового паспорта контура. В нем должны фиксироваться состав объекта, источники данных, ответственные субъекты, регламенты реагирования, частные показатели веса, шкалы риска, границы интерпретации и история пересмотра методики. Без такого паспорта коэффициент остается расчетной абстракцией и не может быть использован как инструмент управления. Итоговая формулировка может быть представлена следующим образом: коэффициент устойчивости цифрового управляющего человеко-машинного контура – это нормированный интегральный показатель, характеризующий способность субъекта управления, цифровой среды, технического объекта, регламента и информационного обмена сохранять качество управленческого решения в условиях изменения параметров транспортного производства и риска перехода процесса в недопустимое состояние.

Такой подход к оценке устойчивости цифрового контура через коэффициент устойчивости цифрового управляющего человеко-машинного контура может стать элементом теоретических основ субъектно-цифрового управления транспортным производством, так как он переводит процессы цифровизации из описания технических средств в плоскость оценки качества управляемости всей организационно-технической системы.

Список литературы

1 Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р (ред. от 06.11.2024) // Минтранс России. – URL: https://mintrans.gov.ru/documents/2/11577 (дата обращения: 11.09.2026).

2 Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 19.12.2025 № 3887-р // Правительство Российской Федерации. – URL: https://static.government.ru/media/files/mg7d54fFfZrm8cdjvEw5RrxqoQzvRvLw.pdf (дата обращения: 11.09.2026).

3 ГОСТ Р 59853-2021. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. – Введ. 01.01.2022. – М. : Стандартинформ, 2021. – 160 с.

4 **Чеботарева, Е. А.** Моделирование элементов профессиональной интуиции в человеко-машинных системах для решения задач оперативного управления железнодорожным транспортом / Е. А. Чеботарева // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 3–4 (82). – С. 61–69. – DOI: 10.33979/2073-7432-2023-3-4(82)-61-69. – EDN YIMQPQ.

5 **Лябах, Н. Н.** Перспективные задачи интеллектуализации процессов управления припортовыми транспортно-технологическими системами / Н. Н. Лябах, Е. А. Чеботарева // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа, Гомель, 16–17 нояб. 2023 г. : в 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 153–155. – EDN BHUDMN.

УДК 004.056:[004.89+004.93]

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АССИСТЕНТОВ НА ОСНОВЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПЕРСОНАЛА

Н. В. РЯЗАНЦЕВА, Д. В. ЯКУБОВИЧ, Т. А. ГОЛДОБИНА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Цифровая трансформация железнодорожного транспорта сопровождается внедрением в диспетчерские центры программных средств на основе больших языковых моделей (Large Language Models, LLM). Такие интеллектуальные ассистенты способны за секунды находить нужный пункт в объемной нормативной базе, обобщать протоколы работы систем диспетчерской и микропроцессорной централизации, готовить проекты распоряжений и справок, отвечать на вопросы персонала на естественном языке. Это сокращает время принятия решений в нестандартных ситуациях и снижает нагрузку на диспетчера. Вместе с тем LLM-ассистент представляет собой принципиально новый класс программного обеспечения: его поведение задается не только кодом, но и текстом, поступающим на вход, а результат работы носит вероятностный характер. Поэтому классические подходы к обеспечению функциональной безопасности систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), основанные на детерминированности и доказательности алгоритмов, к нему напрямую неприменимы, а перечень угроз информационной безопасности требует расширения.

Цель работы – систематизировать угрозы, характерные для LLM-ассистентов в контуре диспетчерского управления, и предложить комплекс архитектурных и организационных мер, исключающих их влияние на безопасность движения.

Исходным положением является то, что ассистент не должен выполнять ответственных функций. В терминологии стандартов EN 50126 и EN 50129 он относится к программному обеспечению, не связанному с безопасностью, и обязан быть функционально и физически отделен от устройств, реализующих ответственные функции. Ассистент формирует только рекомендации, любое управляющее воздействие выполняет человек через штатные, сертифицированные интерфейсы. Однако даже при соблюдении этого принципа ошибочная или подмененная рекомендация способна повлиять на решение диспетчера, поэтому угрозы информационной безопасности ассистента косвенно становятся угрозами безопасности движения.

На основе анализа [1–3] выделены следующие основные группы угроз.

Внедрение инструкций (prompt injection). Прямое внедрение выполняется пользователем, имеющим доступ к ассистенту. Наиболее опасно косвенное внедрение [2]: вредоносные указания размещаются в данных, которые модель обрабатывает как контекст, – в тексте телеграммы, служебного документа, электронного письма, журнала событий. Модель не различает надежно «данные» и «команды», вследствие чего злоумышленник может исказить ответ, скрыть значимый факт или инициировать нежелательное обращение к подключенным сервисам.

Недостоверные ответы («галлюцинации»). Модель может уверенно сослаться на несуществующий пункт инструкции или исказить числовое значение (допустимую скорость, время, номер пути). В условиях дефицита времени диспетчер склонен доверять уверенно сформулированному ответу.

Отравление базы знаний. Ассистенты, как правило, используют схему генерации с извлечением (Retrieval-Augmented Generation, RAG), при которой ответ строится по найденным фрагментам локальной базы документов. Подмена или внесение устаревшей редакции документа в базу приводит к систематически неверным рекомендациям, причем без каких-либо изменений самой модели.

Утечка конфиденциальной информации. При использовании внешних облачных сервисов за пределы организации передаются схемы станций, графики движения, сведения об инфраструктуре и персонале. Кроме того, модель может раскрыть содержимое базы знаний пользователю, не имеющему к нему допуска.

Избыточные полномочия. Подключение ассистента к внешним инструментам (базам данных, почте, системам документооборота) с правами записи превращает успешную атаку внедрения из информационной в операционную.

Нарушение доступности. Зависимость от внешнего провайдера и перегрузка вычислительных ресурсов приводят к отказу сервиса в момент, когда он наиболее востребован.

Для парирования перечисленных угроз предлагается многоуровневая архитектура защиты.

1 Локальное развертывание. Модель с открытыми весами функционирует на вычислительных ресурсах организации в выделенном сегменте сети, классифицированном в соответствии с СТБ 34.101.30 [4]. Данные из систем ЖАТ поступают в сегмент ассистента только через однонаправленный шлюз, что технически исключает обратное воздействие на технологическую сеть; требования к безопасной передаче данных в технологической сети определяются EN 50159.

2 Доверенная база знаний. Каждый документ включается в базу только после утверждения ответственным лицом с фиксацией реквизитов редакции и контрольной суммы; при извлечении фрагмента выполняется проверка его целостности. Устаревшие редакции автоматически исключаются из поиска.

3 Обязательная верифицируемость ответа. Ассистент обязан сопровождать каждое утверждение ссылкой на документ и пункт, а программный модуль контроля проверяет, что приведенная цитата действительно присутствует в указанном источнике. Ответ, не прошедший проверку, помечается как непроверенный. Числовые параметры, влияющие на безопасность движения, отображаются только вместе с исходным фрагментом документа.

4 Разделение данных и инструкций. Внешние документы маркируются как недоверенные, системные указания изолируются от пользовательского ввода, на входе и выходе применяются фильтры, выявляющие типовые конструкции внедрения и признаки раскрытия служебной информации.

5 Принцип наименьших привилегий. Ассистенту предоставляется доступ только на чтение; любое действие, изменяющее состояние внешних систем, требует явного подтверждения пользователем. Права доступа к фрагментам базы знаний наследуются от прав пользователя.

6 Журналирование и тестирование. Все запросы, извлеченные фрагменты и ответы протоколируются для последующего разбора. До ввода в эксплуатацию и после каждого обновления модели или базы знаний проводится состязательное тестирование на наборе сценариев атак, сформированном с учетом [1, 3].

7 Учет человеческого фактора. Технические меры дополняются организационными: в должностные инструкции включается положение о рекомендательном характере ответов ассистента, а при подготовке и периодической аттестации диспетчеров рассматриваются примеры ошибочных ответов модели. Это противодействует эффекту чрезмерного доверия к автоматике, при котором оператор перестает критически оценивать выдаваемые ему рекомендации.

Эффективность мер предлагается оценивать по доле ответов с подтвержденной ссылкой на источник, доле успешно отраженных атак из тестового набора и времени реакции ассистента. Сохранение ассистента в роли советчика, а не исполнителя согласуется с общими принципами обеспечения доверия к системам искусственного интеллекта [5].

Таким образом, LLM-ассистенты могут быть безопасно использованы для поддержки диспетчерского персонала при условии их изоляции от контура управления, контроля целостности базы знаний, обязательной проверяемости ответов и ограничения полномочий. Предложенный комплекс мер обеспечивает преимущество в оперативности работы персонала, не допуская влияния вероятностной природы языковых моделей на безопасность движения поездов.

Список литературы

1 OWASP Top 10 for Large Language Model Applications : version 2025 / OWASP Foundation. – 2024. – URL: https://genai.owasp.org (date of access: 01.10.2026).

2 Not what you've signed up for: compromising real-world LLM-integrated applications with indirect prompt injection / K. Greshake, S. Abdelnabi, Sh. Mishra [et al.] // Proceedings of the 16th ACM Workshop on Artificial Intelligence and Security (AISec '23). – New York : ACM, 2023. – P. 79–90.

3 Adversarial Machine Learning: a Taxonomy and Terminology of Attacks and Mitigations : NIST AI 100-2e2025 / A. Vassilev, A. Oprea, A. Fordyce [et al.]. – Gaithersburg : NIST, 2025.

4 СТБ 34.101.30-2026. Информационные технологии. Методы и средства безопасности. Информационные системы. Классификация. – Взамен СТБ 34.101.30-2017 ; введ. 01.03.2027. – Минск : Госстандарт, 2026. – II, 5 с

5 ГОСТ Р 59276-2020. Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения. – Введ. 01.03.2021. – М. : Стандартинформ, 2021. – 16 с.

УДК 625.1:004.942

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ПРТ-А

М. М. СОКОЛОВ

Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация

При математическом моделировании входного сопротивления рельсовых линий возникает необходимость применения А-параметров четырехполюсников, описывающих схемы замещения трансформаторов систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) [1].

Существующая справочная литература содержит А-параметры таких трансформаторов лишь для стандартных частот 25 и 50 Гц, что не позволяет произвести моделирование в широком диапазоне частот.

При наличии физического образца искомые параметры можно вычислить на основе измерений входных сопротивлений со стороны первичных и вторичных выводов в режимах холостого хода и короткого замыкания [2].

Измерения сопротивления производились измерителем LCR Hantek 1832C с уровнем подаваемого напряжения 600 мВ и на частотах, использовавшихся при проведении эксперимента на инфраструктуре ОАО РЖД (100, 120, 400, 1000, 4000, 10 000 Гц) [3].

Схемы определения входных сопротивлений трансформатора приведены на рисунке 1.

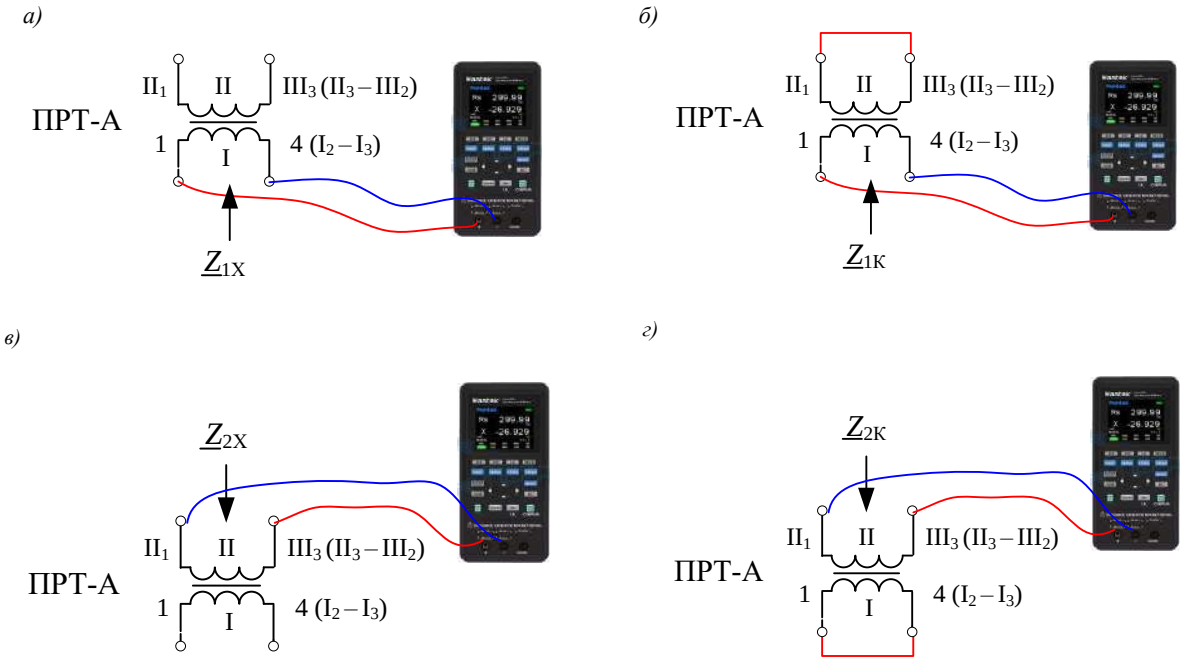


Рисунок 1 – Схемы определения входных сопротивлений трансформатора

Результаты проведенных измерений для различных частот (*f*) трансформатора ПРТ-А приведены в таблице 1.

Таблица 1 – **Результаты измерений входных сопротивлений**

f, Гц	100	120	400	1000	4000	10 000
$\underline{Z}_{1X}$, Ом	$7200 \cdot e^{i74,6^\circ}$	$8100 \cdot e^{i75,5^\circ}$	$15\,200 \cdot e^{i78,5^\circ}$	$30\,733 \cdot e^{i74,7^\circ}$	$108\,000 \cdot e^{i47,2^\circ}$	$2 \cdot 10^5 \cdot e^{-i11,6^\circ}$
$\underline{Z}_{1K}$, Ом	$77,5 \cdot e^{i13,3^\circ}$	$78,6 \cdot e^{i20,4^\circ}$	$117,6 \cdot e^{i50,0^\circ}$	$237,7 \cdot e^{i70,4^\circ}$	$891,5 \cdot e^{i81,8^\circ}$	$2133,5 \cdot e^{i81,8^\circ}$
$\underline{Z}_{2X}$, Ом	$38,0 \cdot e^{i65,2^\circ}$	$43,3 \cdot e^{i64,0^\circ}$	$91,7 \cdot e^{i56,3^\circ}$	$139,2 \cdot e^{i52,1^\circ}$	$327,0 \cdot e^{i36,1^\circ}$	$498,1 \cdot e^{-i19,1^\circ}$
$\underline{Z}_{2K}$, Ом	$0,272 \cdot e^{i13,8^\circ}$	$0,270 \cdot e^{i16,3^\circ}$	$0,367 \cdot e^{i44,0^\circ}$	$0,704 \cdot e^{i66,4^\circ}$	$2,550 \cdot e^{i80,7^\circ}$	$5,994 \cdot e^{i81,6^\circ}$

Для расчета А-параметров четырехполюсников трансформатора по результатам эксперимента воспользуемся формулами [2]:

$$\begin{aligned} \underline{A} &= \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1X}}{\underline{Z}_{2X} - \underline{Z}_{2K}}}; \\ \underline{A}_{12} &= \underline{A}\ \underline{Z}_{2K}; \\ \underline{A}_{21} &= \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{1X}}; \\ \underline{A}_{22} &= \underline{A}_{21}\underline{Z}_{2X}, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $\underline{Z}_{1X}$, $\underline{Z}_{2X}$ – сопротивление холостого хода со стороны первичной и вторичной обмотки соответственно (см. рисунок 1, *а, в*); $\underline{Z}_{1K}$, $\underline{Z}_{2K}$ – сопротивление короткого замыкания со стороны первичной и вторичной обмотки соответственно (см. рисунок 1, *б, г*).

Результаты проведенных расчетов по формулам (1) для трансформатора ПРТ-А приведены в таблице 2.

Таблица 2 – **Результаты расчета А-параметров**

f, Гц	100	120	400	1000	4000	10 000
$\underline{A}_{11}$	$13,70 \cdot e^{i4,5^\circ}$	$13,71 \cdot e^{i5,6^\circ}$	$12,90 \cdot e^{i11,1^\circ}$	$14,90 \cdot e^{i11,3^\circ}$	$18,22 \cdot e^{i5,7^\circ}$	$20,37 \cdot e^{i5,0^\circ}$
$\underline{A}_{12}$	$3,75 \cdot e^{i18,3^\circ}$	$3,70 \cdot e^{i21,9^\circ}$	$4,73 \cdot e^{i55,1^\circ}$	$10,49 \cdot e^{i77,7^\circ}$	$46,47 \cdot e^{i86,4^\circ}$	$122,08 \cdot e^{i87,6^\circ}$
$\underline{A}_{21}$	$0,0019 \cdot e^{-i70,1^\circ}$	$0,00169 \cdot e^{-i69,9^\circ}$	$8,5 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-i67,4^\circ}$	$4,9 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-i63,4^\circ}$	$1,69 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-i41,5^\circ}$	$9,8 \cdot 10^{-5} \cdot e^{i13,8^\circ}$
$\underline{A}_{22}$	$0,0728 \cdot e^{-i4,9^\circ}$	$0,0733 \cdot e^{-i5,9^\circ}$	$0,0778 \cdot e^{-i11,1^\circ}$	$0,0675 \cdot e^{-i11,3^\circ}$	$0,0552 \cdot e^{-i5,4^\circ}$	$0,049 \cdot e^{-i5,3^\circ}$

По результатам серии экспериментов определены А-параметры четырехполюсника трансформатора ПРТ-А для заданного набора частот.

Полученные значения могут быть использованы при моделировании схем рельсовых цепей железнодорожной автоматики и телемеханики, использующих в своем составе данный тип трансформатора. Найденные значения А-параметров были применены в программе для ЭВМ «Имитационная модель рельсовой цепи» [4] при расчете общего входного импеданса трансформатора совместно с участком рельсовой линии. Итоги моделирования подтвердили достоверность значений А-параметров трансформатора, найденных экспериментально-расчётным методом.

Список литературы

1 Визуализация изменения электрических параметров рельсовой цепи при движении подвижной единицы по участку железнодорожного пути / М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич, А. Д. Галеев, Л. А. Елизаров // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты : сб. тр. Национальной науч.-практ. конф., Калининград, 27–31 мая 2025 г. – М. : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. профессора Н. Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА им. профессора Н. Е. Жуковского, 2025. – С. 663–666.

2 **Атабеков, Г. И.** Основы теории цепей : учеб. для вузов / Г. И. Атабеков. – 8-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2024. – 424 с.

3 **Ходкевич, А. Г.** Определение зависимости импеданса рельсовой линии от положения шунта / А. Г. Ходкевич, М. М. Соколов, Л. А. Рыбина // Автоматика, связь, информатика. – 2026. – № 2. – С. 17–19. – DOI: 10.62994/AT.2026.2.2.004.

4 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025667760 Российская Федерация. Имитационная модель рельсовой цепи : заявл. 15.04.2025 : опубл. 09.07.2025 / М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич, Д. А. Елизаров, А. И. Давыдов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения».

УДК 625.1

ПОСТРОЕНИЕ НОМОГРАММ ОБЛАСТЕЙ ВХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ УЧАСТКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

М. М. СОКОЛОВ
Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация

Информация о местоположении железнодорожной подвижной единицы является очень важной с точки зрения обеспечения безопасности движения поездов. При этом точность определения координаты подвижных единиц на железнодорожной линии прямо влияет на пропускную способность участка железной дороги при обеспечении безопасности движения поездов.

В работе [2] показано, что критериями определения местоположения подвижной единицы могут выступать электрические параметры рельсовой линии. В то же время эти параметры меняются в очень широком диапазоне, что усложняет процесс получения и обработки измерительной информации и требует учитывать все возможные сочетания в диапазонах изменения этих параметров. Нагрузкой участка рельсовой линии в идеальных условиях при сухом балласте и наличии изолирующих стыков будет очень большое значение активного сопротивления, практически равное бесконечности. В то же время при отсутствии изолирующих стыков в конце участка (неограниченной рельсовой цепи) в условиях загрязнения или намокания балласта значение сопротивления, нагрузки может уменьшаться вплоть до десятков и единиц Ом. В ситуации, когда в конце участка рельсовой линии подключён дроссель-трансформатор для пропуска обратного тягового тока, нагрузка будет представлять собой активно-индуктивное сопротивление, определяющееся параметрами этого дроссель-трансформатора.

С целью анализа возможного диапазона изменения входного сопротивления рельсовой линии рассмотрим ее схему замещения в случае наличия подвижной единицы на определенной координате. С точки зрения протекания электрического тока рельсовая линия представляет собой схему из продольных элементов, эквивалентных сопротивлению участка рельса, и поперечных элементов эквивалентных сопротивлению изоляции. Схема замещения участка рельсовой линии с подвижной единицей, находящейся на расстоянии l_2 от точки измерения входного сопротивления, представлена на рисунке 1.

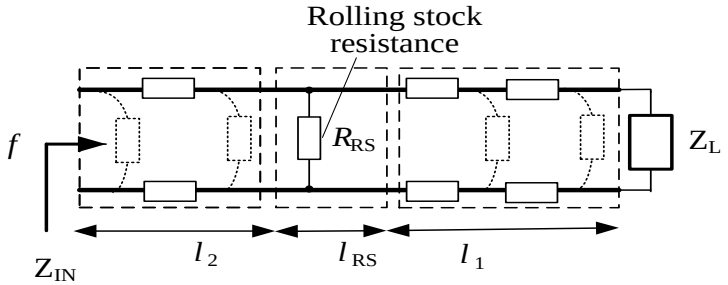


Рисунок 1 – Схема замещения занятого участка рельсовой линии

Схема замещения представляет собой каскадное соединение трёх элементов: свободного участка рельсовой линии до подвижной единицы (l_1), подвижной единицы определённой длины (l_{RS}), свободный участок рельсовой линии за подвижной единицей (l_2). Матрицы А-параметров свободный участок рельсовой линии рассчитываются по известным формулам [2]. Матрица А-параметров схемы замещения подвижной единицы будет определяться длиной подвижной единицы и электропроводностью ее колёсных пар. Входное сопротивление четырёхполюсника (каскадно-соединенных четырехполюсников) вычисляется по формуле дробно-линейного преобразования [1]

$$Z_{IN}(Z_L)=\frac{AZ_L+B}{CZ_L+D}, \qquad (1)$$

где A, B, C, D – А-параметры схемы замещения участка пути с учетом подвижной единицы; Z_L – сопротивление нагрузки; Z_{IN} – входное сопротивление.

Согласно классической теории комплексных переменных конформное отображение области всевозможных значений с неотрицательной действительной частью сопротивления нагрузки участка рельсовой линии позволяет получить область входного сопротивления, имеющую форму окружности или сектора, лежащую в правой полуплоскости (рисунок 2) .

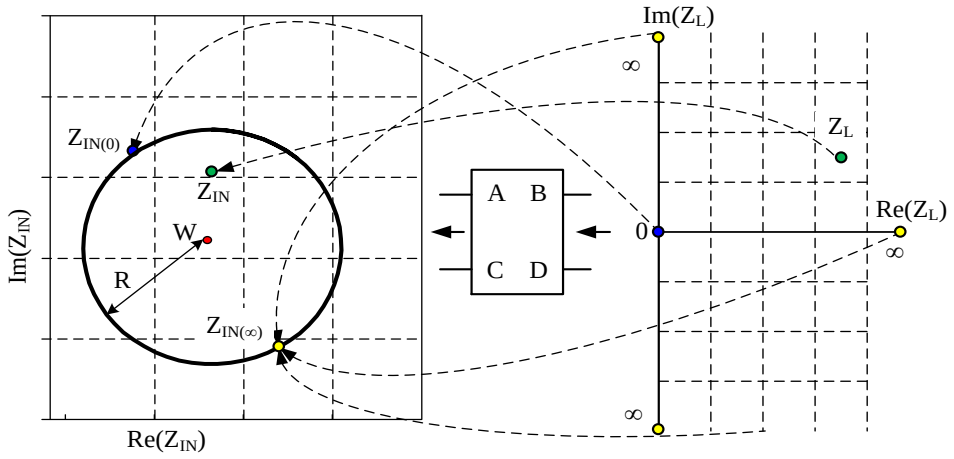


Рисунок 2 – Преобразование области сопротивлений

Проведенное моделирование показало, что для измерения входного сопротивления рельсовой линии среди частот, применяемых в рельсовых цепях Российской Федерации (от 50 до 5500 Гц), наибольшую информативность дают частоты тонального диапазона (400–800 Гц). Этот диапазон частот целесообразно применять в системах определения местоположения подвижных единиц на участке железнодорожной линии.

В качестве примера на рисунке 3 представлены номограммы областей входных сопротивлений занятой рельсовой линии при сопротивлении изоляции от 1 до 1000 Ом·км для координаты расположения подвижной единицы на участке длиной 500 метров с шагом 10 м для частоты 780 Гц соответственно. Дальнейшее увеличение сопротивления изоляции не приводит к значимым изменениям.

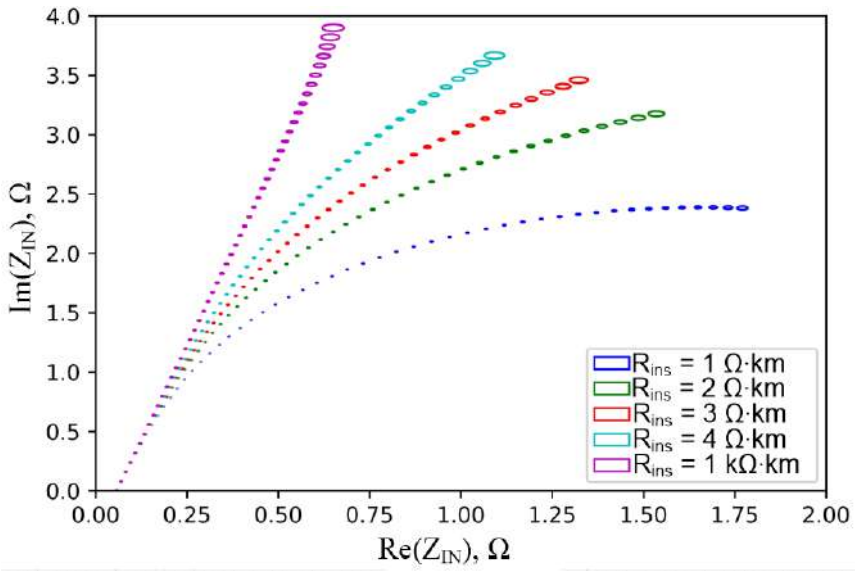


Рисунок 3 – Номограммы входного сопротивления занятого участка рельсовой линии при f = 780 Гц

Список литературы

1 **Ходкевич, А. Г.** Определение зависимости импеданса рельсовой линии от положения шунта / А. Г. Ходкевич, М. М. Соколов, Л. А. Рыбина // Автоматика, связь, информатика. – 2026. – № 2. – С. 17–19. – DOI: 10.62994/AT.2026.2.2.004.

2 Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / В. С. Аркатов, Ю. В. Аркатов, С. В. Казеев, Ю. В. Ободовский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : ООО Миссия-М, 2006. – 496 с.

УДК 656.25:004.9

РАЗРАБОТКА ИНТЕРФЕЙСА ИНТЕРАКТИВНОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ «АВТОМАТИКА И ТЕЛЕМЕХАНИКА НА ПЕРЕГОНАХ»

А. М. ТРУНАЕВ, Д. Ю. КОЖАДЕЕВ, О. С. ФЕДОРОВА
Ростовский государственный университет путей сообщения,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Современная система подготовки специалистов железнодорожного транспорта характеризуется активным внедрением цифровых образовательных технологий, направленных на повышение эффективности освоения инженерных дисциплин. Одним из наиболее сложных направлений подготовки является изучение схем железнодорожной автоматики и телемеханики, поскольку обучающимся необходимо одновременно воспринимать логические взаимосвязи, структуру релейных цепей, алгоритмы работы устройств и принципы функционирования систем интервального регулирования движения поездов [1–3].

Традиционные методы преподавания, основанные преимущественно на использовании статических изображений, печатных схем и текстовых описаний, не всегда обеспечивают достаточную наглядность процессов функционирования устройств автоматики. В результате у студентов возникают трудности при анализе логических зависимостей, отслеживании изменений состояний схем и формировании устойчивых практических навыков.

В условиях цифровизации образовательной среды возрастает роль специализированных программных средств, обеспечивающих интерактивное взаимодействие с учебным материалом. Использование визуализации позволяет представить сложные логические процессы в динамической форме, повысить степень вовлеченности обучающихся и сократить время освоения инженерных дисциплин [4, 5].

Целью работы является разработка концептуальных принципов построения универсального программного интерфейса для электронных курсов по изучению схем железнодорожной автоматики и телемеханики.

При изучении дисциплин, связанных с железнодорожной автоматикой и телемеханикой, обучающиеся сталкиваются с необходимостью анализа большого объема логической информации. К числу наиболее сложных элементов относятся релейные схемы, цепи управления, системы автоматической блокировки, устройства электрической централизации и алгоритмы интервального регулирования движения поездов.

С педагогической точки зрения визуализация рассматривается как один из базовых инструментов формирования инженерного мышления. Представление логических процессов в графической форме позволяет снизить когнитивную нагрузку, упростить восприятие взаимосвязей между элементами схемы и повысить эффективность запоминания материала [1, 2].

Интерактивные обучающие средства обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами представления информации:

– обеспечивают динамическое отображение изменения состояний элементов схемы;
– позволяют пошагово анализировать выполнение логических алгоритмов;
– упрощают изучение причинно-следственных связей;
– повышают мотивацию обучающихся за счет интерактивного взаимодействия.

Существующие программные решения, применяемые в образовательном процессе, как правило, ориентированы либо на моделирование отдельных логических устройств, либо на изучение ограниченного круга задач. Кроме того, многие системы требуют установки дополнительных программных компонентов, обладают сложным интерфейсом или недостаточно адаптированы под специфику железнодорожной автоматики [4, 5].

Указанные недостатки определяют необходимость разработки специализированного программного комплекса, ориентированного на изучение схем железнодорожной автоматики и телемеханики с учетом дидактических и эксплуатационных требований.

В качестве базового языка разработки был выбран C++, обеспечивающий высокую производительность и возможность создания автономного программного обеспечения без использования дополнительных виртуальных сред исполнения.

Применение нативной компиляции позволяет обеспечить стабильную работу программного комплекса даже на малопроизводительных вычислительных системах, что особенно важно при использовании программного обеспечения в компьютерных классах образовательных организаций.

Для построения графического интерфейса используется Win32 API, обеспечивающий прямое взаимодействие с операционной системой Windows. Такой подход позволил реализовать полноэкранный режим отображения, поддержку масштабирования, двойную буферизацию изображения и адаптацию интерфейса под различные разрешения экрана.

Разработанный программный комплекс включает два основных компонента:

– модуль формирования электронных учебных материалов;

– модуль отображения и изучения схем.

Реализована возможность автоматического воспроизведения учебного материала с регулируемой скоростью, что позволяет использовать программный комплекс как при самостоятельной подготовке студентов, так и в ходе проведения лекционных и практических занятий.

Структура хранения данных организована в виде набора каталогов, содержащих графические и текстовые файлы. Такой подход обеспечивает возможность быстрого добавления новых тем без перекомпиляции приложения и позволяет преподавателю самостоятельно формировать электронные курсы без специальных навыков программирования.

Особое внимание уделено поддержке Unicode и корректному отображению русскоязычных символов, математических обозначений и элементов схем. Дополнительно реализован механизм вставки изображений в текстовое описание с использованием специальных тегов.

Интерфейс программного комплекса адаптируется под размеры окна приложения. Основное пространство занимает изображение схемы, а область текстового описания автоматически масштабируется и поддерживает прокрутку. Программный комплекс сохраняет работоспособность во всех актуальных версиях операционной системы Windows и может запускаться без установки непосредственно с внешнего носителя данных.

В работе рассмотрены особенности разработки универсального интерфейса для электронных курсов по изучению схем железнодорожной автоматики и телемеханики. Показано, что применение интерактивной визуализации позволяет повысить эффективность восприятия логических процессов, упростить анализ релейных схем и улучшить качество подготовки специалистов железнодорожного транспорта.

Разработанный программный комплекс обеспечивает автономное формирование и использование электронных учебных материалов без необходимости применения сторонних образовательных платформ. Реализованные механизмы визуализации и интерактивного взаимодействия позволяют использовать систему при изучении дисциплин, связанных с электрической централизацией, автоматической блокировкой и системами интервального регулирования движения поездов.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанного программного комплекса в учебном процессе транспортных вузов и организаций среднего профессионального образования при подготовке специалистов по направлениям «Автоматика и телемеханика на транспорте» и «Системы обеспечения движения поездов».

Список литературы

1 **Mayer, R. E.** Multimedia Learning / R. E. Mayer. – 3rd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2020. – 624 p.

2 **Пластинина, Л. И.** Реализация образовательных программ с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий на примере дисциплины ОП.02. Электротехника для специальности 27.02.03 Автоматика и телемеханика на транспорте (железнодорожном транспорте) / Л. И. Пластинина // Инновационные процессы в современном образовании: практики, технологии, решения. – 2021. – С. 98–106. – EDN DDKWKE.

3 **Бабошин, В. А.** Инновационные технологии в методике подготовки кадров по специализации автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте / В. А. Бабошин, К. Н. Савинов, А. В. Коновалова // Инновационные технологии в педагогике высшей школы. – 2022. – С. 24–37. – EDN HHQUEQ.

4 **Швалов, Д. В.** Учебный комплекс на базе интерактивного пульта релейной ЭЦ / Д. В. Швалов, С. А. Кулькин, В. Д. Швалов // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 9. – С. 37–39. – DOI: 10.62994/AT.2025.9.9.006. – EDN OSTSXC.

5 **Швалов, Д. В.** Подготовка студентов-целевиков для реализации задач цифровой трансформации / Д. В. Швалов // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 7. – С. 32–34. – EDN RXSUYF.

6 **Трунаев, А. М.** Использование фреймворка Streamlit для создания виртуальных лабораторных работ в виде веб-приложений / А. М. Трунаев, Г. В. Коваленко, С. А. Радковский // Цифровые инфокоммуникационные технологии. – 2024. – № 4 (75). – С. 184–189. – EDN EBVMUC.

УДК 656.259:004.9

МЕХАНИЗМ ОПЕРАТИВНОЙ АКТУАЛИЗАЦИИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ УСТРОЙСТВ СЦБ В УСЛОВИЯХ НЕПРЕРЫВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. М. ТРУНАЕВ, О. С. ФЕДОРОВА
Ростовский государственный университет путей сообщения,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Техническая документация устройств железнодорожной автоматики и телемеханики является одним из ключевых элементов обеспечения безопасности движения поездов и устойчивой работы объектов железнодорожной инфраструктуры [1, 9]. Исполнительные схемы, кабельные журналы и монтажные планы используются при техническом обслуживании, ремонте, модернизации и аварийно-восстановительных работах.

В условиях непрерывной эксплуатации устройств СЦБ изменения схемных решений нередко выполняются значительно быстрее, чем завершается полный цикл их согласования и внесения в исполнительную документацию. В результате возникает временное несоответствие между фактическим состоянием устройств и используемыми схемами.

Подобная рассинхронизация способна привести к увеличению времени поиска неисправностей, ошибочным переключениям и снижению эффективности эксплуатационной работы. Особенно критично данная проблема проявляется при устранении отказов и выполнении аварийно-восстановительных мероприятий.

Действующий порядок внесения изменений предусматривает многоступенчатую процедуру согласования, включающую оформление актов технических изменений, проверку документации и утверждение изменений руководством дистанции либо профильными службами [2, 3, 6].

На практике подобные процедуры могут занимать от нескольких суток до нескольких недель. При этом замена реле, изменение кабельных соединений, переключение цепей питания и иные эксплуатационные изменения нередко выполняются в течение короткого времени для восстановления нормального движения поездов.

В период до завершения согласования изменений:

– исполнительные схемы не отражают фактическое состояние устройств;

– электронные архивы содержат устаревшие данные;

– оперативный персонал использует неактуальную документацию.

Наиболее опасной ситуация становится при возникновении отказов устройств автоматики. Использование устаревших схем может привести к неправильным отключениям, ошибочным переключениям и увеличению времени устранения неисправностей [7, 10].

Дополнительной проблемой является рост трудозатрат при проведении комиссионных осмотров и сверке документации. Персоналу приходится сопоставлять фактическое состояние устройств с несколькими версиями схем и уточнять историю выполненных изменений.

Для сокращения периода несоответствия между фактическим состоянием устройств и исполнительной документацией предлагается внедрение механизма «Лист оперативных изменений» (ЛОИ).

ЛОИ представляет собой временный документ оперативного учета, предназначенный для фиксации изменений в период между выполнением работ и выпуском новой утвержденной версии документации.

Основными задачами ЛОИ являются:

– оперативная фиксация изменений;

– предоставление актуальной информации эксплуатационному персоналу;

– сокращение периода рассинхронизации документации;

– обеспечение последующего архивирования изменений.

После выполнения работ электромеханик оформляет ЛОИ в электронной системе дистанции СЦБ. В документе указываются объект, тип устройства, номер схемы, описание выполненных изменений, причина работ и данные исполнителя.

В качестве причин внесения изменений могут выступать:

– устранение отказа;

– модернизация оборудования;

– выполнение предписаний;

– замена элементов с истекшим сроком службы.

После упрощенного согласования ответственным руководителем ЛОИ получает статус временно действующего документа и используется совместно с исполнительной схемой до утверждения новой редакции документации.

Электронная версия ЛОИ прикрепляется к карточке объекта в базе данных дистанции. Для бумажной документации предусматривается нанесение отметки о наличии временных изменений непосредственно на исполнительную схему.

После утверждения новой версии документации ЛОИ переводится в архивный статус.

Предлагаемый механизм позволяет существенно сократить период несоответствия между фактическим состоянием устройств и исполнительной документацией. Актуализация информации выполняется практически сразу после внесения изменений, что снижает вероятность ошибочных действий персонала при эксплуатации устройств СЦБ.

Дополнительным преимуществом является повышение прозрачности учета изменений. Централизованное хранение ЛОИ обеспечивает контроль сроков подготовки новой документации и упрощает анализ истории выполненных работ.

Использование механизма ЛОИ также способствует сокращению трудозатрат при комиссионных проверках и технических осмотрах, поскольку эксплуатационный персонал получает оперативный доступ к информации о временных изменениях.

Проблема несоответствия исполнительной документации фактическому состоянию устройств СЦБ является следствием недостаточной адаптации существующих процессов ведения документации к условиям непрерывной эксплуатации железнодорожной автоматики.

Предлагаемое внедрение Листа оперативных изменений позволяет обеспечить временную актуализацию документации до завершения полного цикла согласования изменений, повысить оперативность сопровождения схемных решений и снизить вероятность ошибок при эксплуатации устройств автоматики и телемеханики.

Реализация предложенного механизма способствует повышению эффективности эксплуатационной работы дистанций СЦБ, снижению трудозатрат при техническом обслуживании и повышению уровня безопасности движения поездов.

Список литературы

1 Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утв. приказом Минтранса России от 23 июня 2022 г. № 250. – Москва, 2022. – 664 с.

2 Инструкция по ведению технической документации устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 15.04.2022 № 1034/р. – М. : ОАО «РЖД», 2022. – 98 с.

3 ГОСТ 2.503–2013. Единая система конструкторской документации. Правила внесения изменений. – Введ. 01.06.2014. – М. : Стандартинформ, 2014. — 24 с.

4 СТО РЖД 05.010–2018. Система управления нормативной и технической документацией в ОАО «РЖД». – М. : ОАО «РЖД», 2018. – 46 с.

5 СТО РЖД 19.001-2021. Средства железнодорожной автоматики и телемеханики. Порядок ввода в эксплуатацию, технического обслуживания и ремонта микропроцессорных устройств сигнализации, централизации и блокировки. – М. : ОАО «РЖД», 2021. – 76 с.

6 **Сапожников, Вл. В.** Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / Вл. В. Сапожников. – М. : Маршрут, 2003. – 263 с.

7 **Сапожников, Вл. В.** Станционные системы автоматики и телемеханики: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Вл. В. Сапожников, В. Б. Лавров, А. А. Ефанов. – М. : УМЦ ЖДТ, 2015. – 408 с.

8 ГОСТ 2.051–2013. Единая система конструкторской документации. Электронные документы. Общие положения. – Введ. 01.06.2014. – М. : Стандартинформ, 2014. – 16 с.

9 ГОСТ Р 2.601–2019. Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы. – Введ. 29.04.2019. – М. : Стандартинформ, 2019. – 36 с.

10 **Швалов, Д. В.** Комплекс моделей принятия решений в задачах прогнозирования состояния технических средств и процессов управления движением поездов / Д. В. Швалов // Интеллектуальные транспортные системы. – 2023. – С. 426–430.

УДК 656.25

МЕТОД ОЦЕНКИ ОХВАТА ДИАГНОСТИКОЙ СЛОЖНЫХ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ПОДСИСТЕМ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАСЧЕТОВ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

С. Н. ХАРЛАП
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Выполнение расчетов показателей функциональной безопасности систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) является обязательным этапом подтверждения соответствия установленным требованиям. Основным показателем функциональной безопасности является интенсивность опасных отказов, методика расчета которой для различных безопасных структур определена нормативными документами, в частности стандартом [1].

Для типовой безопасной двухканальной структуры «два из двух», которая в настоящее время является самой распространенной, формула расчета интенсивности опасных отказов выглядит следующим образом [1, п. *B*.3.3.2.4]:

$$\lambda_{Dsys} = \lambda_{D2v2} + \lambda_{Dcomp} + \lambda_{CCF}, \quad (1)$$

где λ_{Dsys} – интенсивность опасных отказов системы; λ_{D2v2} – интенсивность опасных отказов двухканальной структуры; λ_{Dcomp} – интенсивность опасных отказов схемы сравнения; λ_{CCF} – интенсивность отказов по общей причине.

Из практического опыта проведения экспертизы и выполнения расчетов показателей безопасности в научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и ЭМС технических средств» следует, что в случае отсутствия аппаратного диверситета значение интенсивности отказов по общей причине λ_{CCF} превышает остальные слагаемые этой формулы. Значение λ_{CCF} можно определить следующим образом [1, приложение *D*]:

$$\lambda_{Dsys} = \beta\lambda_{DU}, \quad (2)$$

где β – доля отказов одного канала, которые влияют на все остальные каналы, т. е. являются отказами по общей причине; λ_{DU} – интенсивность опасных отказов одного канала, которые не обнаруживаются встроенными диагностическими средствами (необнаруживаемые опасные отказы).

Интенсивность необнаруживаемых опасных отказов можно вычислить через охват диагностикой и общую интенсивность отказов одного канала. Метод расчета охвата диагностикой изложен в [2, приложение *C*] и базируется на анализе видов и последствий отказов *FMEA*. Охват диагностикой вычисляется как отношение интенсивности обнаруженных опасных отказов к интенсивности всех опасных отказов. Если речь идет о системе, состоящей из некоторого количества подсистем, то формула вычисления охвата диагностикой принимает вид

$$DC = \frac{\sum \lambda_{DD}}{\sum \lambda_D}, \quad (3)$$

где λ_{DD} – интенсивность опасных отказов, которые обнаруживаются встроенными диагностическими средствами (обнаруживаемые опасные отказы); λ_D – интенсивность опасных отказов. Для программируемых элементов (тип *B* по [2]) принято считать, что $\lambda_D = \frac{1}{2}\lambda$, где λ – интенсивность всех отказов одного канала.

Тогда, учитывая, что $\lambda_D = \lambda_{DU} + \lambda_{DD}$, формула (2) принимает вид

$$\lambda_{Dsys} = \beta\lambda_{DU} = \beta(1 - DC)\lambda_D = \frac{1}{2}\beta(1 - DC)\lambda. \quad (4)$$

Таким образом, можно сказать, что расчетное значение охвата диагностикой оказывает значительное влияние на итоговый результат. Как уже было сказано, для расчета значения *DC* необходи-

мо выполнить анализ видов и последствий отказов. Однако для программируемых элементов выполнить детальный анализ *FMEA* невозможно, а укрупненный анализ не позволяет определить количество опасных отказов и количество обнаруживаемых отказов в элементе. Поэтому рассчитать точное значение *DC* не представляется возможным.

Частично эту задачу можно решить на качественном уровне путем соотнесения действительного охвата диагностикой с одним из фиксированных уровней: низкий – от 0 до 60 %, средний – от 60 до 90 % и высокий – от 90 до 99 %. Для этого в [2, таблица *A*.1] приведены требования по типам отказов, которые должны обнаруживаться диагностикой для соответствующего уровня *DC*. Например, во внутреннем ОЗУ процессора для обеспечения низкого уровня *DC* достаточно диагностировать константные отказы данных и адресов, для среднего уровня необходимо дополнительно диагностировать неисправности данных и адресов при постоянном токе и исправимые ошибки (сбои), а для высокого уровня – перекрестные помехи в ячейках памяти, а также множественную адресацию.

Такой подход хорошо работает в том случае, если разработчик реализует диагностику только отказов, относящихся к одному уровню *DC*, например константные отказы данных и адресов. В этом случае, зная эффективность метода диагностики, можно получить значение DC_{el} для всего элемента. Однако часто разработчик использует несколько методов диагностики, которые позволяют обнаруживать отказы, принадлежащие различным уровням *DC*. Например, метод «Программное самотестирование – блуждающий бит» позволяет обнаруживать во внутреннем ОЗУ процессора все константные отказы данных (часть низкого уровня) и неисправности данных при постоянном токе (часть среднего уровня), но не позволяет обнаруживать константные отказы адресов (низкий уровень) и исправимые ошибки (средний уровень). В этом случае возникает задача, как получить значение DC_{el} для всего элемента. Можно использовать консервативную оценку охвата диагностикой, при которой DC_{el} равен верхнему значению уровня, отказы которого полностью диагностируются. Однако такой подход приводит к завышению итоговой интенсивности опасных отказов, что может привести к несоответствию требованиям нормативных документов и дополнительным затратам.

Предлагается метод расчета охвата диагностикой, который заключается в следующем. На первом этапе для выбранного элемента выполняется оценка доли от общего числа отказов, которые приходятся на каждый вид отказов. Например, для реализации низкого уровня охвата диагностикой внутреннего ОЗУ процессора необходимо контролировать два вида отказов: константный отказ данных и константный отказ адресов. Выполняется экспертная оценка доли каждого вида отказа. Можно предположить, что количество этих отказов примерно одинаково, т. е. 50 % приходится на константные отказы данных и 50 % – на константные отказы адресов. Так как на низкий уровень DC приходится 60 % (0,6) от общего числа отказов, то тогда доля от общего числа отказов, приходящаяся на константные отказы данных, будет равна 30 % (0,3). Аналогично выполняется оценка доли от общего числа отказов для всех видов отказов из [2, таблица *A*.1], результаты оценки представлены в колонке 2 таблицы 1.

На втором этапе выполняется анализ примененных методов диагностики с точки зрения эффективности в обнаружении каждого вида отказов. Если метод позволяет обнаруживать все отказы данного вида, то в колонку 4 таблицы 1 записывается значение 100 %, как, например, для метода «Блуждающий бит» по отношению к виду отказов «Константный отказ данных». Однако при этом надо учитывать ограничения методов, указанных в [1, таблица *C*.2] и [2, приложение *A*]. Например, для метода «Тест ОЗУ: блуждающая траектория» в [2, таблица *A*.6] указано, что максимально достижимый уровень охват диагностикой не выше среднего, поэтому при использовании его для обнаружения отказов вида «Перекрестные помехи в ячейках памяти», которые относятся к высокому уровню *DC*, мы устанавливаем значение *DC* в колонке 4 таблицы 1 равным 0,9.

Далее вычисляется охват диагностикой для всего элемента как сумма долей, полученных произведением значений из колонок 2 и 4 таблицы 1. Итоговое значение должно сравниваться с допустимыми диапазонами охватов диагностикой, приведенными в [1, таблица *C*.2]. Так, полученное итоговое значение *DC* для внутреннего ОЗУ процессора составило 83,5 %. Допустимый диапазон значений составляет 75–95 %. Таким образом, полученное значение можно считать реальным диагностическим охватом. Если бы мы использовали консервативную оценку, то получили бы охват диагностикой, равный 60 %, что значительно хуже реального значения.

Таблица 1 – **Пример расчета охвата диагностикой для внутреннего ОЗУ процессора**

Вид отказа (уровень *DC*)	Доля от общего числа отказов	Метод диагностики	*DC* для вида отказов	Доля от общего *DC* элемента
1	2	3	4	5
Константный отказ данных (*LOW*)	0,3	Блуждающий бит	1	0,3
Константный отказ адресов (*LOW*)	0,3	Тест ОЗУ: блуждающая траектория	1	0,3
Неисправности данных при постоянном токе (*MEDIUM*)	0,1	Блуждающий бит	0,9	0,09
Неисправности адресов при постоянном токе (*MEDIUM*)	0,1	Тест ОЗУ: блуждающая траектория	1	0,1
Изменение информации, вызванное исправимыми ошибками (*MEDIUM*)	0,1	Нет	0	0
Перекрестные помехи в ячейках памяти (*HIGH*)	0,05	Тест ОЗУ: блуждающая траектория	0,9	0,045
Отсутствует, неверная или множественная адресация (*HIGH*)	0,05	Нет	0	0
Итого для элемента	1			0,835

Таким образом, предложенный метод позволяет получить более точную оценку охвата диагностикой, что в свою очередь позволит получить и более точное значение интенсивности опасных отказов. Кроме того, данная методика может быть использована также для количественной оценки и прогнозирования достижимого уровня полноты безопасности систем железнодорожной автоматики и телемеханики на основе архитектурных ограничений [3].

Список литературы

1 ГОСТ Р МЭК 61508-6-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Ч. 6. Руководство по применению ГОСТ Р МЭК 61508-2 и ГОСТ Р МЭК 61508-3. – Введ. 01.08.2013. – М. : Стандартинформ, 2014. – 102 с.

2 ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Ч. 2. Требования к электрическим, электронным, программируемым электронным системам, относящимся к безопасности. – Введ. 29.10.2012. – М. : Стандартинформ, 2014. – 80 с.

3 **Харлап, С. Н.** Метод количественной оценки и прогнозирования достижимого уровня полноты безопасности систем железнодорожной автоматики и телемеханики на основе архитектурных ограничений и его программная реализация / С. Н. Харлап, О. И. Яковцева // Интеллектуальные транспортные системы : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 21 мая 2026 г. – М. : РУТ (МИИТ), 2026. – С. 761–769.

УДК 656.25:62-192

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ β-ФАКТОРА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ОЦЕНКИ ОТКАЗОВ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ

С. Н. ХАРЛАП, Д. Д. МЕДВЕДЕВ, И. О. ЖИГАЛИН
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Системы железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) относятся к системам, отказ которых может привести к тяжёлым последствиям: столкновению, сходу подвижного состава, проезду запрещающего сигнала. Поэтому к ним предъявляются требования по функциональной безопасности вплоть до уровня SIL4, для достижения которого обычно применяются двух- или трёхканальные структуры с безопасным сравнением результатов работы каналов. Интенсивность опасных отказов такой системы вычисляется по формуле

$$\lambda_{Dsys} = \lambda_{D2v2} + \lambda_{Dcomp} + \lambda_{CCF}, \quad (1)$$

где λ_{Dsys}, λ_{D2v2}, λ_{Dcomp} и λ_{CCF} – интенсивности опасных отказов системы, двухканальной структуры, схемы сравнения и отказов по общей причине (*CCF*) соответственно.

Согласно EN 50129 [1] отказами по общей причине можно пренебречь только при аппаратном и программном диверситете каналов. Для каналов на одинаковых микроконтроллерах (МК) λ_{CCF} на несколько порядков превышает остальные слагаемые и определяется β-фактором – долей отказов канала, приходящейся на *CCF*. По ГОСТ Р МЭК 61508-6 [2, приложение *D*] β-фактор зависит от суммы баллов $S = X + Y$ за 37 мероприятий защиты от *CCF* [2, таблица *D*.1], причём пользователь сам определяет, какие мероприятия реализованы [2, п. *D*.5, примечание 2]. Однако стандарт не говорит, как поступать с мероприятиями, неприменимыми к изделию: например, разнесение обслуживания каналов по времени не имеет смысла для необслуживаемого изделия. Решение по мероприятиям, касающимся обслуживания и конструкции изделия (пункты № 1, 14, 25–27, 33, 36 из [2, таблица *D*.1]), меняет сумму баллов более чем на 15 % (18,5 из 112,5 баллов) и становится основным предметом обсуждения между разработчиком и экспертом по функциональной безопасности.

Возможны три подхода к учёту таких мероприятий: (а) консервативный – мероприятие даёт 0 баллов; (б) предлагаемый – мероприятие засчитывается полностью, если механизм возникновения *CCF*, против которого оно направлено, физически отсутствует и это доказано; (в) нормирование – мероприятие исключается из суммы и из максимума с пересчётом порогов β-фактора, что стандартом не предусмотрено.

Подход (б) применим при следующих условиях: механизм *CCF* физически отсутствует; по каждому мероприятию есть обоснование со ссылкой на конструкторскую документацию; ограничения (запрет ремонта на месте, замена блоком) перенесены в эксплуатационную документацию [2, п. *D*.1, примечание 1]; однородные мероприятия (№ 14, 25, 33) оцениваются по одному правилу; взаимоисключающие мероприятия не суммируются; мероприятия, зависящие от организации работ № 12, 13, 21–24, 32, 37, засчитываются только при наличии записей и протоколов. С учётом этих условий все мероприятия делятся на четыре группы: засчитываемые по конструкции (№ 2, 3, 6 или 7, 8 или 9, 10 или 11, 15, 18–20, 31, 34, 35); засчитываемые по подходу (б) (№ 1, 26, 36 при отсутствии межканальных и силовых кабелей, № 14, 25, 27, 33 для необслуживаемого изделия); неприменимые к подсистеме (для логической подсистемы – № 4, 5, 8, 9, 31); подтверждаемые только документально (№ 12, 13, 16, 17, 21–24, 32, 37).

Рассмотрим изделие из двух МК, которые обмениваются данными только для сравнения результатов; выходы каналов объединены схемой «И», при расхождении результатов изделие переходит в защитное состояние. В железнодорожной нотации это структура 2oo2, в МЭК 61508 – 1oo2 [3]. Исходные данные: $\lambda_{МК} = 1 \cdot 10^{-8}$ 1/ч, доля опасных отказов – 0,5, диагностический охват – 90 % ($\lambda_{DU} = 5 \cdot 10^{-10}$ 1/ч), интервал диагностики – 5 мин ($Z = 0{,}5$ по [2, таблица *D*.2]). Мероприятия, которые для этого изделия засчитываются по подходу (б), и обоснование их учёта приведены в таблице 1.

Таблица 1 – **Мероприятия, засчитываемые по подходу (б)**

№	Мероприятие (формулировки сокращены)	X_{LS}	Y_{LS}	Обоснование учёта по подходу (б)
1	Сигнальные кабели каналов разделены	1,5	1,5	Межканальные кабели отсутствуют
14	Каналы обслуживаются в разное время разными людьми	3,0	–	Изделие необслуживаемое, техническое обслуживание на месте не проводится
25	Обслуживание каналов разнесено по времени	1,5	0,5	То же; изделие заменяется целиком
26	Процедуры обслуживания требуют независимости и закрепления резервирующих кабелей	0,5	0,5	Резервирующие кабели отсутствуют
27	Ремонт плат вне места установки с тестированием перед установкой	0,5	1,0	Ремонт только у изготовителя с последующими испытаниями
33	Обслуживающий персонал обучен причинам и следствиям *CCF*	0,5	4,5	Персонал не вмешивается в работу изделия, что закреплено в эксплуатационной документации
36	Сигнальные и силовые кабели отделены друг от друга	2,0	1,0	Сигнальные и силовые кабели в изделии отсутствуют
	Итого	**9,5**	**9,0**	

Для такой системы консервативная оценка, при которой мероприятия № 1, 14, 25–27, 33, 36 не засчитываются, даёт сумму баллов $S = 57$ и $\beta = 2$ %. Если воспользоваться предложенной методикой и учитывать эти мероприятия, поскольку межканальные и силовые кабели в изделии отсутствуют, а изделие необслуживаемое и ремонтируется только у изготовителя, то сумма баллов со-

ставит $S = 75{,}5$, что соответствует $\beta = 1$ %. Результаты расчёта по формуле (1) (λ_{D2V2} – по [2, приложение *B*], $\lambda_{Dcomp} = \lambda_{D2V2}$, $\lambda_{CCF} = \beta\lambda_{DU}$) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – **Сравнение консервативной оценки и предложенной методики**

Показатель	Консервативная оценка (подход (а))	Предложенная методика (подход (б))
Суммы баллов X / Y	25,0 / 32,0	34,5 / 41,0
$S = X + Y$ (β)	57 (2 %)	75,5 (1 %)
$S_D = X(Z + 1) + Y$ (β_D), $Z = 0{,}5$	69,5 (2 %)	92,75 (1 %)
$\lambda_{D2v2} = \lambda_{Dcomp}$, 1/ч	$3{,}8\cdot10^{-17}$	$3{,}9\cdot10^{-17}$
$\lambda_{CCF} = \beta\lambda_{DU}$, 1/ч	$1{,}0\cdot10^{-11}$	$5{,}0\cdot10^{-12}$
λ_{Dsys} по формуле (1), 1/ч	$1{,}0\cdot10^{-11}$	$5{,}0\cdot10^{-12}$

Предложенная методика уменьшает β-фактор с 2 до 1 % и вдвое снижает λ_{Dsys}, что увеличивает запас при распределении допустимой интенсивности опасных отказов между элементами системы. Сумма $S = 75{,}5$ лежит внутри диапазона 70–120 [2, таблица *D*.4], поэтому результат устойчив к небольшим изменениям оценки отдельных мероприятий.

Таким образом, предложенный метод позволяет обоснованно учитывать мероприятия, неприменимые к оцениваемой системе, если механизм возникновения соответствующих *CCF* физически отсутствует, а ограничения закреплены в эксплуатационной документации. Для двухканальной системы на одинаковых МК он значительно снижает β-фактор и расчётную интенсивность опасных отказов по сравнению с консервативной оценкой.

Список литературы

1 EN 50129:2026. Railway applications – Communication, signalling and processing system – Safety related electronic systems for signalling. – URL: https://i7.antpedia.com/standard/files/pdfs_ora/20260526/BS%20EN%2050129-2026.pdf (date of access: 11.09.2026).

2 ГОСТ Р МЭК 61508-6–2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Ч. 6. Руководство по применению ГОСТ Р МЭК 61508-2 и ГОСТ Р МЭК 61508-3. – Введ. 01.08.2013. – М. : Стандартинформ, 2014. – 109 с.

3 Анализ методов построения функционально безопасных структур на элементной базе различной сложности / Е. Н. Розенберг, Н. Г. Пенькова, С. В. Ипатов, К. А. Бочков // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2025. – № 2 (51). – С. 4–13.

УДК 004.056.53:378.147.88

БАЗОВЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС СТУДЕНЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

С. Н. ХАРЛАП, В. Е. МИНИН, С. В. КИСЕЛЕВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Современное обучение специалистов по информационной безопасности невозможно без практической работы. Студенту важно не только знать основные понятия и методы защиты, но и самостоятельно увидеть, как происходит атака, какие следы она оставляет и как ее можно обнаружить. При этом создание полноценной учебной лаборатории часто связано с двумя проблемами: стоимостью коммерческого программного обеспечения и риском для реальной *IT*-инфраструктуры университета.

На начальном этапе эти проблемы можно решить без значительных затрат. Большинство базовых навыков специалиста по информационной безопасности можно отрабатывать с использованием бесплатного программного обеспечения с открытым исходным кодом, развернутого в изолированной виртуальной среде. Такой подход позволяет создать учебный полигон, в котором студенты будут проводить атаки и эксперименты, не затрагивая реальные информационные системы университета.

Базовый программный комплекс лаборатории может включать несколько групп инструментов:

1 Инфраструктурное программное обеспечение.

2 Средства анализа безопасности информационных систем.

3 Мониторинг сети и обнаружение вторжений.

4 Сбор событий и управление инцидентами.

5 Уязвимые учебные системы.

Фундаментом для построения учебной лаборатории служит виртуализация, а для создания изолированных учебных стендов предполагается задействовать следующее программное обеспечение: *Proxmox VE, VirtualBox* и *EVE-NG* [1, 2]. *Proxmox VE* является гипервизором первого типа и будет использоваться как основная платформа виртуализации. На его основе создаются отдельные виртуальные машины и сетевые сегменты для учебных экспериментов. Преимущество такого подхода заключается в возможности быстро создавать копии виртуальных машин, делать снимки их состояния и восстанавливать стенд после завершения лабораторной работы. *VirtualBox* является более простым вариантом виртуализации и может использоваться непосредственно на компьютерах студентов. Он позволяет запускать серверные системы и рабочие станции, уязвимые учебные системы и стенды без необходимости выделять отдельный физический сервер. Этот гипервизор удобен для индивидуальных практических заданий, в том числе и на персональных компьютерах студентов. Среда *EVE-NG* предназначена для виртуализации сетевой инфраструктуры. С ее помощью можно создавать виртуальные топологии с коммутаторами, маршрутизаторами, межсетевыми экранами и различными сетевыми сегментами и исследовать влияние сетевой архитектуры на безопасность. Система мониторинга *Zabbix* дополняет лабораторию средствами наблюдения за состоянием инфраструктуры. С ее помощью можно отслеживать доступность серверов и сетевого оборудования, загрузку процессора, оперативную память, дисковое пространство и другие параметры. Это позволяет не только контролировать оборудование и системы лаборатории, но и наглядно показать различие между мониторингом состояния инфраструктуры и мониторингом событий безопасности.

В качестве инструментов аудита и анализа защищенности информационных систем предполагается использовать операционную систему *Kali Linux*, а также операционные системы семейств *Linux* и *Windows*. *Kali Linux* предоставляет набор средств для сетевого сканирования, анализа уязвимостей и моделирования атак [3]. *Debian* и *Ubuntu* служат основой для построения серверных и пользовательских систем. Для воспроизведения отдельных действий атакующей стороны применяется набор утилит *Atomic Red Team*, позволяющий отрабатывать известные техники атак в контролируемой среде.

Важным элементом для получения навыков в сфере информационной безопасности являются средства и системы анализа и мониторинга сетевого трафика. *Wireshark* используется для анализа сетевого трафика [4]. Студенты смогут наблюдать реальные сетевые пакеты, изучать работу протоколов *TCP/IP*, *DNS, HTTP* и других протоколов, а также искать признаки подозрительной активности. *Snort* и *Suricata* позволяют изучать работу систем обнаружения сетевых атак [5, 6]. Они анализируют сетевой трафик и сравнивают его с правилами обнаружения известных видов подозрительной активности. В лаборатории на их основе можно показать, как создаются правила обнаружения и почему одна и та же атака может быть обнаружена или, наоборот, остаться незамеченной. *OPNsense* может выполнять роль центрального сетевого элемента лаборатории. Он объединяет функции маршрутизатора, межсетевого экрана и других сетевых сервисов. С его помощью студенты могут создавать правила фильтрации, разделять сеть на сегменты и наблюдать, как изменение одного правила влияет на возможность доступа к системам. Это позволяет на практике изучать принцип минимально необходимого доступа и сетевую сегментацию.

Основным рабочим инструментом команды защиты информационных ресурсов является система управления событиями безопасности (*SIEM*): программная платформа для централизованного сбора, нормализации, анализа и хранения логов (журналов событий) из всей *IT*-инфраструктуры в режиме реального времени. В учебной лаборатории в роли такой платформы выступает *Wazuh* – свободно распространяемое *SIEM*-решение с открытым исходным кодом. На его примере студенты осваивают полный цикл работы с событиями безопасности: от настройки источников и написания правил корреляции до разбора сформированных оповещений и первичной классификации инцидентов.

Наконец, для имитации атак (наступательной практики) нужны специально подготовленные системы с известными уязвимостями. В качестве таких объектов выступают *OWASP Juice Shop, DVWA, Metasploitable* и другие учебные полигоны. Их применение позволяет моделировать реальные атаки без обращения к реальным информационным системам.

Вышеперечисленный набор программного обеспечения позволит закрыть значительную часть задач по информационной безопасности. Главное преимущество такой лаборатории заключается не в количестве установленных программ, а в возможности связать их в единый учебный сценарий. Например, студент может изменить правило межсетевого экрана *OPNsense*, выполнить атаку из *Kali Linux* на уязвимое приложение, а затем выступить в роли *SOC*-аналитика и обнаружить эту активность с помощью *Wazuh* и анализа трафика в *Wireshark*.

Такой подход формирует у студентов целостное понимание процесса: атака – следы – обнаружение – анализ – реагирование. При этом все эксперименты проводятся в контролируемой среде и не создают угрозы для реальной *IT*-инфраструктуры университета.

Список литературы

1 Proxmox Virtual Environment: official documentation // Proxmox. – URL: https://pve.proxmox.com/pve-docs/ (date of access: 09.08.2026).

2 EVE-NG: documentation // EVE-NG. – URL: https://www.eve-ng.net/index.php/documentation/ (date of access: 09.08.2026).

3 Kali Linux: penetration testing and ethical hacking Linux distribution // Kali Linux. – URL: https://www.kali.org/tools. – (date of access: 10.08.2026).

4 Wireshark: network protocol analyzer documentation // Wireshark. – URL: https://www.wireshark.org/docs/ (date of access: 10.08.2026).

5 Snort: documentation // Snort. – URL: https://www.snort.org/documents (date of access: 10.08.2026).

6 Suricata documentation: rules format // Suricata documentation. – URL: https://docs.suricata.io/en/latest/rules/intro.html (date of access: 10.08.2026).

7 Wazuh documentation // Wazuh – URL: https://documentation.wazuh.com/current/index.html (date of access: 11.08.2026).

УДК 681.518.5:656.25

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ О ТЕХНИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

В. Д. ШВАЛОВ
Ростовский государственный университет путей сообщения,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Сегодня основными средствами управления движением поездов на станциях служат системы электрической централизации стрелок и светофоров. Такая система представляет собой комплекс постовых и напольных устройств, в который входят рельсовые цепи, стрелочные электроприводы, светофоры, электрические схемы реализации логических зависимостей и алгоритмов, аппаратура управления и контроля, источники электропитания, кабельные сети. От надежной и бесперебойной работы систем электрической централизации зависят безопасность и качество перевозочного процесса в целом.

Устройства железнодорожной автоматики и телемеханики являются наиболее уязвимым звеном в системе обеспечения безопасности движения поездов. Находясь в условиях непосредственного воздействия динамических нагрузок от подвижного состава и других внешних факторов, данные устройства нуждаются в постоянном обслуживании. Современная стратегия развития ОАО «РЖД» предполагает переход от планово-предупредительного ремонта к обслуживанию «по состоянию». Основная цель такого перехода – снижение эксплуатационных расходов и минимизация возникновения отказов. Однако у данного вида технического обслуживания существует ряд системных проблем (недостаточная глубина анализа «предотказных» состояний, сложность условий эксплуатации, «шумность» данных и т. д.), которые возникают из-за сложного устройства железнодорожного оборудования, многообразия влияющих внешних факторов и нелинейного характера процессов.

Формирование достоверной информации о состоянии устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) является основной задачей систем технического диагностирования и мониторинга. Важным этапом обслуживания устройств ЖАТ является постоянный мониторинг состояния устройств, выявление предотказных состояний и анализ произошедших отказов.

Одной из главных проблем в диагностике устройств напольного оборудования является наличие слабоформализованных задач. Это задачи, для которых:

1 Отсутствует полное математическое описание процесса.

2 Данные являются неполными, «зашумленными» или имеют качественный (описательный) характер.

3 Критерии отказа выражены неявным образом и зависят от вида эксплуатации устройства.

К нештатным ситуациям относятся ситуации с отклонением от нормальных (штатных) условий эксплуатации, а также проектные и запроектные аварийные ситуации. Анализ и предотвращение нештатных ситуаций требует разработки специализированных методов и алгоритмов обработки информации, которые позволят оперативно определить наличие неисправности и принять соответствующие меры. Основной задачей в настоящее время является раннее обнаружение отклонений от нормального функционирования системы управления движением поездов, таких как остановка или задержка поезда, аварийное торможение, отказ в работе сигнальных устройств, напольного оборудования и другие.

Проблема исследования и обнаружения нештатных ситуаций на железнодорожном транспорте рассматривалась многими учеными [1]. Однако в работе данных ученых и многих других аналогичных работах рассматривается проблема прогнозирования нештатных ситуаций, связанных с техническими отказами или техногенными катастрофами. Проблема прогнозирования или упреждающего обнаружения нештатных ситуаций технологического характера на железнодорожном транспорте и, в частности, в системах оперативно-диспетчерского управления до настоящего времени систематически не разрабатывалась. Наиболее близко предлагаемому подходу отвечают разрабатываемые Российскими и зарубежными учеными методы детектирования аномалий в темпоральных данных. Их можно сгруппировать в три категории: прогнозирование «с учителем», «частично с учителем» и «без учителя» [2]. Все вышеприведенные и другие аналогичные подходы обладают рядом недостатков, среди которых основными являются невозможность детектировать априори неизвестные аномалии или паттерны с искаженной сигнатурой; невозможность обработки гетерогенных данных в условиях нечетко-стохастической неопределенности; невозможность учета априорной экспертной информации; вычислительные сложности по реализации on-line обработки потоковых данных.

Также еще одним из наиболее распространенных методов обнаружения нештатных ситуаций в системах ЖАТ является использование датчиков, систем или подсистем мониторинга состояния объектов железнодорожной инфраструктуры и поездов. Датчики могут быть размещены на путях, станциях, поездах и других элементах системы управления движением. Они контролируют различные параметры, такие как скорость, положение поезда, наличие вибрации и температуру, и передают полученные данные в пункт управления. Другой подход основан на анализе данных о движении поездов. С помощью алгоритмов машинного обучения возможно выявить аномалии или нештатные ситуации в поведении поезда. Например, изменение скорости или направления движения может указывать на проблемы с объектами инфраструктуры или оборудованием. В [3] проведен анализ применения на сети железных дорог ОАО «РЖД» датчиков обледенения, погодных и метеостанций, входящих в состав систем очистки стрелочных переводов российского производства, а также рассмотрены их типы и принципы действия. Учитывая уже имеющиеся разработки в данной области, был предложен инновационный датчик определения льда или снега на контролируемой поверхности.

Перспективным подходом в процессе обнаружения нештатных ситуаций является использование искусственного интеллекта и методов машинного обучения. Используя данные алгоритмы, возможно создать модели, которые будут обучаться на основе архивированных данных и смогут заранее предсказывать возникновение возможных нештатных ситуаций. Например, такая модель будет предупреждать о возможных сбоях в работе устройств сигнализации, централизации и блокировки.

В настоящее время интеллектуальные информационные системы становятся неотъемлемым элементом при решении задач автоматизации и управления сложными объектами и процессами. Существует широкий спектр интеллектуальных методов прогнозирования нештатных ситуаций. Функционирование таких систем основано на интеллектуальных методах, которые можно разделить на несколько категорий в зависимости от используемых подходов и алгоритмов. Выбор подходящего метода зависит от конкретной задачи, доступных данных и требований к точности и интерпретируемости. В большинстве реальных приложений используются гибридные подходы, комбинирующие несколько методов для достижения наилучших результатов. Для прогнозирования возникновения неисправностей напольного оборудования возможно применение следующих методов искусственного интеллекта:

1 Искусственные нейронные сети – применяются для распознавания образов и прогнозирования временных рядов. Преимуществом данного метода является наличие возможности моделировать сложные нелинейные зависимости. Недостатком является сложная интерпретация результата и отсутствие информации о причинах возможного отказа.

2 Методы нечеткой логики – применяются для решения слабоформализованных задач. Преимуществом данного метода является способность формализовать опыт экспертов и работать с неопределенностью. Недостатком является сложное построение функций принадлежности при большом количестве входных параметров.

Список литературы

1 **Гришина, Е. Н.** О применении интеллектуального анализа временных рядов в задачах сокращения размерности пространства признаков на основе выявления зависимостей / Е. Н. Гришина, М. Н. Рыжова // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика. – 2014. – № 3. – С. 95–104.

2 **Журавлев, Ю. И.** Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения / Ю. И. Журавлев, В. В. Рязанов, О. В. Сенько. – М. : ФАЗИС, 2006. – 176 с.

3 **Бубнов, В. П.** Анализ датчиков автоматической системы обогрева стрелочных переводов / В. П. Бубнов, В. А. Барусов, Ш. Х. Султонов // Автоматика, связь, информатика. – 2022. – № 4. – С. 8–11. – DOI 10.34649/AT.2022.4.4.002.

УДК [656.257+681.518.5]:004.94

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ

Д. В. ШВАЛОВ, В. А. ВЫГРИЯНОВА
Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Автоматизация таких задач, как выявление фактического состояния (неисправное, предотказное), определение причин возникновения нарушений нормальной работы (неисправных состояний), прогнозирования состояния и остаточного ресурса устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, является одним из актуальных и перспективных направлений развития методов и средств технического диагностирования и мониторинга. В качестве одного из способов решения этих задач в настоящее время рассматривается разработка цифровых двойников различных объектов [1–3]. Контроль состояния элементов и поиск причин отказов релейных схем электрической централизации (ЭЦ) является одной из наиболее сложно реализуемых практических задач в связи с большой сложностью и низкой контролепригодностью схем. Последнее можно объяснить тем, что при создании релейных систем ЭЦ задача разработки их диагностического обеспечения не ставилась.

Цифровые двойники схем наборной и исполнительной групп релейных ЭЦ должны выполнять следующие диагностические функции:

– сравнение фактического алгоритма функционирования объекта с эталонным;

– выявление аномалий в алгоритмах функционирования и их причин.

Архитектура (структура) цифрового двойника может быть представлена в виде двух взаимосвязанных моделей, одна из которых имитирует логику работы схем наборной и исполнительной групп, а вторая содержит математическое описание процессов изменения электрических параметров (сила тока) в цепях питания в соответствии с алгоритмом работы схем. Для съема информации в выбранных контрольных точках могут быть использованы контакты реле и кнопок, а также типовые модули ввода аналоговых и дискретных сигналов системы технического диагностирования и мониторинга. Обобщенный алгоритм функционирования цифрового двойника (ЦД) показан на рисунке 1.

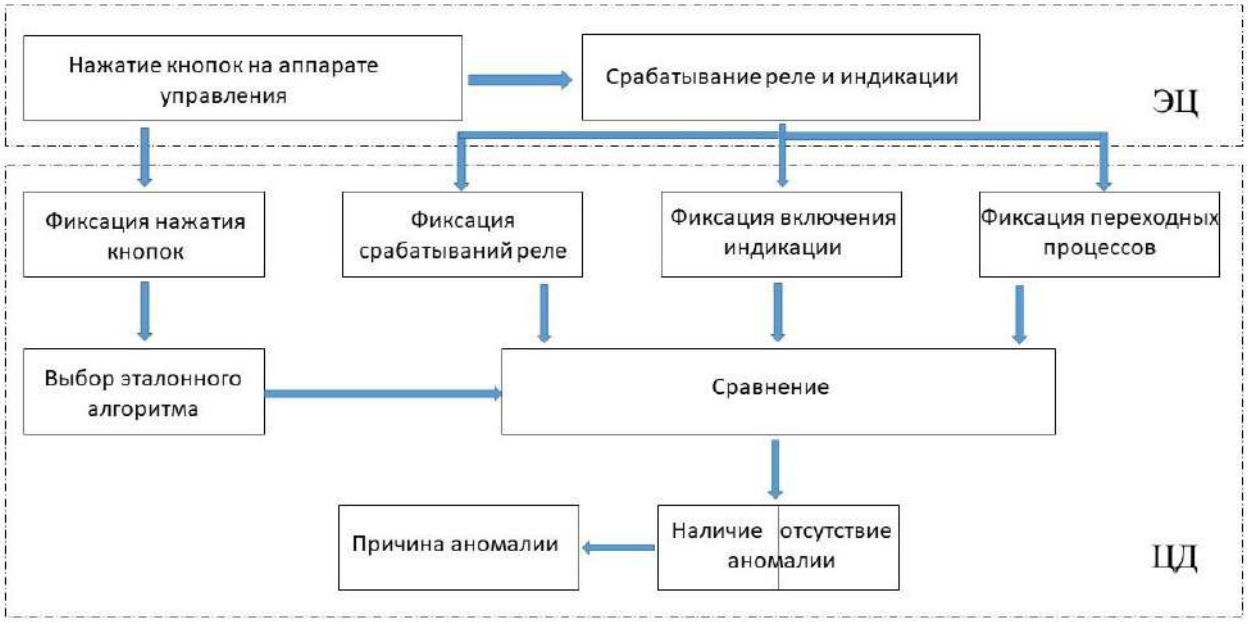


Рисунок 1 – Обобщенный алгоритм функционирования цифрового двойника

Выбор эталонного алгоритма должен производиться для следующих режимов функционирования ЭЦ:

– установка маршрута;
– размыкание маршрута;
– отмена маршрута;
– искусственное размыкание маршрута;
– включение пригласительного сигнала;
– повторное открытие светофора в замкнутом маршруте.

Основными компонентами модели принятия решений цифрового двойника являются база знаний, содержащая логические правила принятия решений; динамическая база данных, отражающая состояние объекта в текущий момент времени и динамику его изменения; статическая база данных, содержащая информацию о значениях неизменяемых параметров объекта.

При разработке алгоритмов принятия решений должны использоваться логические правила, построенные на основе типовых конструкций следующих форматов, показанных на рисунке 2.



Рисунок 2 – Типовые конструкции логических правил

На основании информации, сформированной цифровым двойником, реализуются функции поддержки принятия решений для эксплуатационного персонала, которому в режиме реального времени предоставляется информация о причине отказа, что является важным фактором для решения задачи сокращения непроизводительных затрат времени в процессе технической эксплуатации устройств электрической централизации [4].

Список литературы

1 Реализация цифрового двойника железнодорожной рельсовой цепи / А. Г. Ходкевич, М. М. Соколов, А. И. Давыдов [и др.] // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : сб. тр. XXII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию президента РТУ МИРЭА, академика РАН, д-ра физ.-мат. наук, профессора А. С. Сигова. – М. : 2025. – С. 457–460.

2 **Тарасов, Е. М.** Анализ перспектив интеграции цифровых двойников на основе мониторинга состояния с использованием машинного обучения в аппаратуру железнодорожной инфраструктуры / Е. М. Тарасов, И. С. Бредун // Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте : материалы V Всерос. науч.-практ. конф. – Самара, 2023. – С. 12–14.

3 Мониторинг технического состояния управления входными светофорами на основе использования технологии цифровых двойников / Д. В. Швалов, В. Г. Давиденко, А. М. Лященко, Д. В. Глазунов // Цифровые инфокоммуникационные технологии : сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 40-летию факультета «Информационные технологии управления» и 50-летию кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте». – Ростов н/Д, 2022. – С. 279–283.

4 **Пультяков, А. В.** Управление инцидентами при оперативном контроле состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики центрами технической диагностики и мониторинга / А. В. Пультяков, В. А. Алексеенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 4 (76). – С. 192–205. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).

УДК 656.25

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ИЗ КОМПОНЕНТОВ, СЕРТИФИЦИРОВАННЫХ ПО ДРУГИМ СТАНДАРТАМ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Д. Н. ШЕВЧЕНКО
ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Республика Беларусь

Основополагающим стандартом по функциональной безопасности (ФБ) электронных систем управления является стандарт IEC 61508. Но его дочерние стандарты (IEC 61511, IEC 62061, IEC 62425, IEC 62425, ISO 13849, ISO 26262, EN 50126 и др.) предъявляют к уровням полноты безопасности (УПБ) отличающиеся требования. Соответствие компонента некоторому УПБ по некоторому стандарту не гарантирует соответствие данного компонента аналогичному УПБ по другому стандарту ФБ.

Для построения системы безопасности, к которой предъявляются требования УПБ в соответствии с некоторым стандартом, должны использоваться только компоненты, соответствующие требуемому для компонента УПБ по требуемому стандарту. Например, для реализации бортовой системы ж.-д. подвижного состава (к функциям которой в соответствии с ГОСТ 33435-2023 предъявляются требования УПБ по ГОСТ Р МЭК 61508-2012) недопустимо применять компоненты, не соответствующие требуемому для компонента УПБ по ГОСТ Р МЭК 61508-2012 (даже если этот компонент сертифицирован по ж.-д. стандартам EN 50126, IEC 62425 или автомобильному стандарту ISO 26262 и имеет по данному стандарту больший УПБ).

При построении сложных систем безопасности разработчики сталкиваются с дефицитом компонентов, сертифицированных на требуемый УПБ по требуемому стандарту ФБ. Но принимать решение об используемой элементной базе необходимо уже на 3–6-м этапах жизненного цикла безопасности системы (ЖЦ, по ГОСТ 33432-2015). При этом нужно быть уверенными, что к 9-му этапу ЖЦ внешняя независимая экспертиза согласится с корректностью и полнотой обоснований разработчика относительно достижимого УПБ компонентов (по требуемому стандарту ФБ). Однако разработчик системы не обязан иметь знаний и компетенций для подтверждения соответствия компонентов, несертифицированных или сертифицированных по другим стандартам ФБ, требованиям нужного стандарта. Стандарты не указывают взаимное соответствие УПБ друг с другом (только стандарт ISO 13849 содержит сведения о соответствии уровня эффективности защиты PL и УПБ по IEC 61508.). Кроме того, разработчик системы не имеет полномочий (аккредитации) для подтверждения соответствия компонентов, сертифицированных по другим стандартам, требованиям нужного стандарта ФБ. В лучшем случае Орган по сертификации примет и проанализирует доказательства, предоставленные разработчиком. Для некоторых компонентов (например, микроконтроллеров, ПЛК и др.) подтверждение соответствия по нужному стандарту ФБ не может быть выполнено никем кроме производителя компонентов (ввиду отсутствия в открытом доступе всей необходимой информации).

В таких условиях актуальна разработка инженерной методики, позволяющей формализовать действия разработчика для решения обозначенных проблем:

– определения принципиальной возможности разработки и успешной сертификации системы безопасности по нужному стандарту ФБ;

– выбора стандарта ФБ, если такая возможность допускается;

– выбора компонентов для системы, которые могут обеспечить требуемый УПБ по требуемому стандарту ФБ (в том числе самостоятельного подтверждения соответствия компонентов разработчиком системы);

– перераспределения требований между компонентами с учетом возможности самостоятельного подтверждения соответствия компонентов.

Для определения возможности самостоятельного корректного определения УПБ компонента по нужному стандарту требуется рассмотреть ответы на следующие вопросы:

– компонент типа A или B (по IEC 61508);

– компонент имеет сертификат УПБ по другому стандарту ФБ;

– компонент содержит встроенное программное обеспечение (ПО, базовое, системное).

Если компонент типа B, не имеет сертификата ни по одному стандарту ФБ, содержит системное ПО, то самостоятельное (без производителя) определение достижимого УПБ по требуемому стандарту ФБ для такого компонента практически невозможно и нецелесообразно. Подобные компоненты не следует рассматривать к возможному использованию в разрабатываемой системе.

Наиболее простым является определение достижимого УПБ (по требуемому стандарту) для компонентов типа A, имеющих сертификат УПБ по одному из стандартов ФБ. Единственной проблемой тут является определение соответствия УПБ по двум различным стандартам ФБ.

Автором проделана исчерпывающая работа в отношении требований стандартов к свойствам случайных отказов аппаратных средств. Было выявлено, что существующие стандарты нормируют три группы показателей ФБ:

1) допустимая интенсивность отказов функции безопасности TFFR (EN 50126:2017), THR (IEC 62425:2011);

2) средняя (в течение заданного интервала) частота отказов функции безопасности PFH (IEC 61508:2010, IEC 61511:2016, IEC 62061:2021, ISO 13849:2023);

3) средняя (в течение заданного интервала или срока службы) вероятность отказов функции безопасности за час PFH_D (ГОСТ ISO 13849-2014, ГОСТ Р МЭК 62061-2015), PMHF (ISO 26262:2018).

При условии равенства рассматриваемых интервалов времени (сроков службы устройств) усреднения частоты/вероятности опасных отказов показатели 2-й и 3-й группы количественно тождественны между собой, хотя отличаются размерностями. Разработана модель взаимного пересчета TFFR/THR в PFH/PFH_D/PMHF для допущения постоянной интенсивности наступления результирующего события, связанного с отказом функции безопасности.

По другим критериям, определяющим требования к УПБ (рисунок 1), методика требует дополнительной проработки.

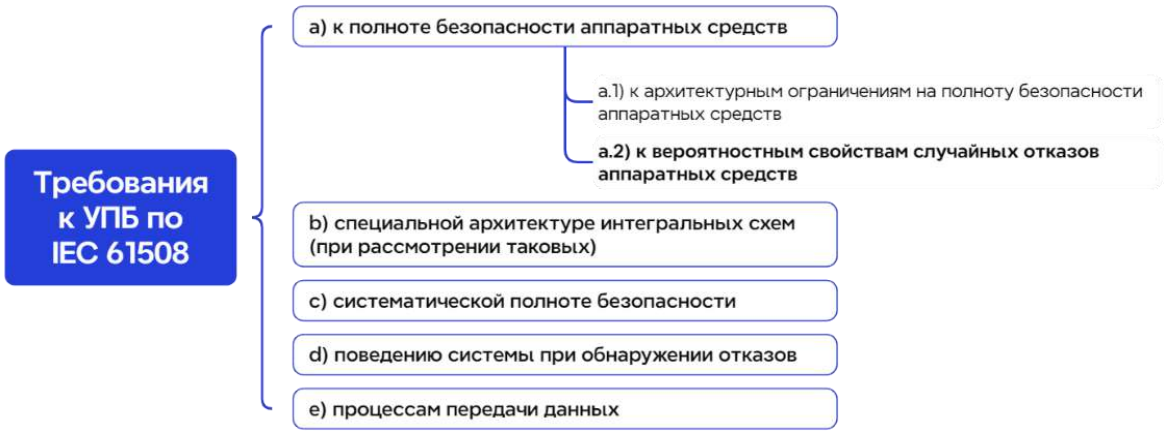


Рисунок 1 – Общая структура требований к УПБ

Список литературы

1 **Шевченко, Д. Н.** Требования стандарта IEC 61508 к вероятностным свойствам случайных отказов / Д. Н. Шевченко // Контроль качества продукции. – 2026. – № 5. – С. 34–38.

УДК 656.25

РАЗМЕРНОСТЬ МЕТРИКИ PMHF СТАНДАРТА ISO 26262

Д. Н. ШЕВЧЕНКО
ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Республика Беларусь

Метод сравнения является основным при подтверждении соответствия объектов предъявляемым количественным требованиям. При этом (в соответствии с прикладной метрологией) возможно сравнение (как и сложение, вычитание) только величин, имеющих одинаковую размерность. Поэтому весьма актуален вопрос корректности размерностей нормируемых показателей надежности и

функциональной безопасности. В противном случае ни одна корректная модель расчета показателя не сможет быть принята для объекта при подтверждении соответствия Органами по сертификации.

Доклад посвящен обсуждению размерности показателя функциональной безопасности устройств управления автомобильного транспорта, нормируемого отраслевым стандартом ISO 26262.

В период разработки первой версии ISO 26262:2011 действующий основополагающий стандарт IEC 61508:1998 нормировал вероятность отказа функции безопасности (ФБ) за час в течение рассматриваемого интервала времени T (обычно срока службы устройства):

$$P(t, t+1) = P(t < \xi \le t+1),\ \forall\ t \in (0,\ T-1), \tag{1}$$

где ξ – наработка устройства до отказа ФБ с функцией распределения $F(t)$ и функцией плотности распределения $f(t)$ (рисунок 1).

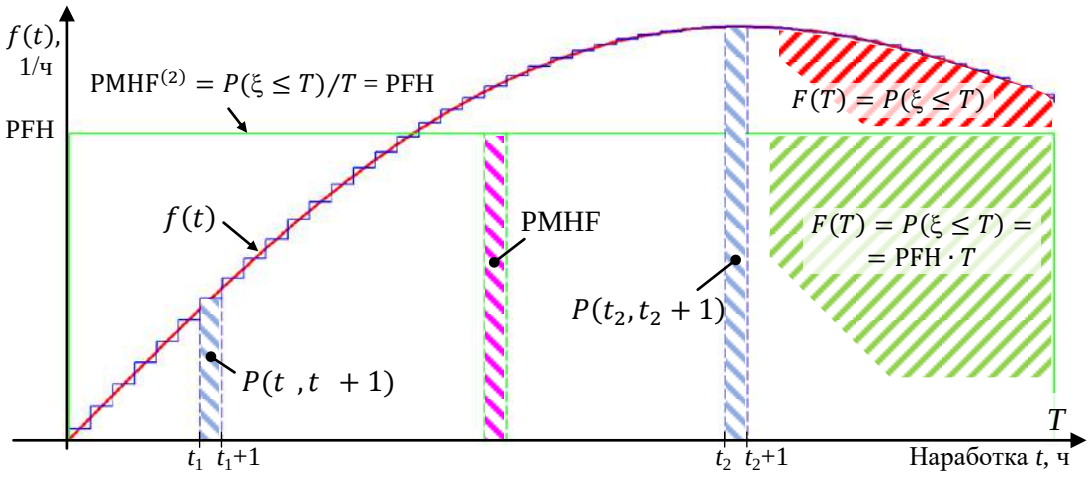


Рисунок 1 – Вероятность отказа ФБ за час, усредненная в течение срока службы T объекта

В то время, как вторая редакция IEC 61508:2010 стала нормировать PFH – среднюю частоту отказов ФБ, авторы ISO 26262 заменили учет вероятности отказа ФБ в течение каждого отдельного часа (1) на обобщенное среднее значение (см. рисунок 1). Такой подход не требует детального анализа закона распределения ξ (см. рисунок 1), позволяет ограничиться общей вероятностью $P(\xi \le T)$ отказа ФБ в течение времени T. Таким образом, для характеристики вероятностных свойств случайных отказов аппаратных средств стандарт ISO 26262 определил показатель PMHF (Probabilistic Metric for random Hardware Failures) – вероятностную метрику случайных отказов аппаратных средств, которая определяется как средняя вероятность отказа устройства, реализующего цели безопасности, за час на протяжении срока службы устройства T.

Источники, аналогичные [2], предлагают вычислять PMHF как отношение вероятности отказа ФБ в течение срока службы и продолжительности срока службы T:

$$\text{PMHF}^{*} = P(\xi \le T)\ /\ T. \tag{2}$$

Вероятно, модель (2) позволила разработчикам стандарта ISO 26262 указать размерность показателя PMHF «1/час». Однако величина PMHF с размерностью «1/час» не может быть средней для безразмерных вероятностей (1) по следующим причинам:

1) она не может считаться обобщенным показателем усредняемых величин $P(t, t+1)$, поскольку не может быть с ними сравнима из-за отличающихся размерностей;

2) она не удовлетворяет условию среднего по Коши [3];

3) указанная модель не является одной из моделей средних [3, 4] для вероятностей (1).

Указанная неточность стандарта [1] тиражировалась в новых и национальных версиях стандарта, в ряде научных публикаций и документации. Она затрудняет корректное понимание нормируемого показателя специалистами и может приводить к конфликтам при обеспечении и подтверждении требований к функциональной безопасности систем управления автомобилем, в том числе из-за невозможности сравнения показателей, имеющих разную размерность.

В соответствии с определением [1, п. 9.4.2.1] показатель PMHF вычисляется усреднением функции $P(t, t + 1)$ – вероятности опасного отказа устройства в течение интервала времени $(t, t + 1)$ длительностью 1 час, начиная с момента t – на интервале T (срок службы устройства).

Поскольку: а) усредняемые вероятности $P(t, t + 1)$ представлены в количественной шкале отношений [3]; б) при замене каждой отдельной вероятности $P(t, t + 1)$ на среднее значение необходимо обеспечить неизменность суммы вероятностей, т. е. общую вероятность опасного отказа в течение срока службы T; в) вероятности $P(t, t +1)$ для любых t имеют одинаковую значимость, то для определения PMHF следует использовать модель простого среднего арифметического [3, 4].

Если вероятности $P(t, t + 1)$ опасного отказа за час рассматривать как функцию, определенную только в дискретные моменты времени: 0, 1, 2, 3, …, $T – 1$ (см. рисунок 1), то модель усреднения будет выглядеть так:

$$\text{PMHF}^{\text{д}} = \frac{P(0,1) + P(1,2) + P(2,3) + ... + P(T-1,T)}{N} = \frac{1}{N}\sum_{t=0}^{T-1} P(t,t+1). \quad (3а)$$

Здесь N – количество непересекающихся отрезков времени длительностью 1 час на рассматриваемом интервале времени T. Величина N численно совпадает с T, но величина N (количество интервалов) безразмерная.

Сумма вероятностей в числителе выражения (3а) есть вероятность опасного отказа устройства в течение срока службы T. Поэтому выражение (3а) можно записать в другом виде:

$$\text{PMHF}^{\text{д}} = \frac{P(0,1) + P(1,2) + P(2,3) + ... + P(T-1,T)}{N} = \frac{1}{N} P(\xi \le T) = \frac{1}{N} F(T) = \frac{1}{N}\int_0^T f(t)dt. \quad (3б)$$

Все величины и функции в выражениях (3а) и (3б) аналогичны тем, что использованы в выражении (1) и (2). Видно, что выражения (2) и (3б) отличаются лишь знаменателями, точнее размерностями величин в знаменателях. Показатель PMHF, вычисленный по (3а) и (3б), безразмерный.

Если вероятность рассматривать как непрерывную функцию времени t, то можно использовать интегрирование

$$\text{PMHF}^{\text{н}} = \int_0^T P(t,t+1)dt, \quad (4)$$

которое также предоставляет безразмерный результат.

Уточнение размерности показателя PMHF имеет важное научное значение – обеспечение научной достоверности; практическое значение – возможность применять корректные модели вычисления PMHF и выполнять сравнение расчетных и нормативных показателей, что допустимо только при тождестве их размерностей; а также методическое значение – исключение конфликтов между специалистами, обеспечивающими выполнение требований к функциональной безопасности ответственных систем, и независимыми оценщиками, подтверждающими выполнение требований.

Список литературы

1 ISO 26262-5:2018. Road vehicles – Functional safety. Part 5: Product development at the hardware level.

2 **Sakurai, A.** Formulas of the Probabilistic Metric for Random Hardware Failures to Resolve a Dilemma in ISO 26262 / A. Sakurai // Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 24–27 January 2022. – DOI: 10.1109/RAMS51457.2022.9893961.

3 **Орлов, А. И.** Прикладной статистический анализ : учеб. / А. И. Орлов. – М. : Ай Пи Ар Медиа, 2022. – 812 с.

4 **Shevchenko, D.** The dimension of the PMHF functional safety metric of ISO 26262 standard / D. Shevchenko, V. Netes, A. Starovoitov // Reliability: Theory & Applications. – 2026. – № 21 (2). – P. 106–112.

4 ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 656.7.022(261.1):656.078:629.73.063.6

ОПТИМИЗАЦИЯ НАЗНАЧЕНИЯ ТРЕКОВ В NAT OTS ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ ЗАТРАТ

А. А. АПОНИК
Белорусская государственная академия авиации, г. Минск

Отсутствие радиолокационного покрытия на большей части акватории и высокая интенсивность движения обусловили необходимость внедрения жёстких структурных ограничений для обеспечения безопасности полётов. Основой организации движения здесь служит Система организованных треков (OTS), представляющая собой набор ежедневно обновляемых маршрутов, учитывающих положение струйных течений и преобладающие направления трафика [1]. Однако именно те нормы эшелонирования, требования сохранения скорости и трека на протяжении всего океанического участка, а также невозможность перехода между треками, которые делают OTS безопасной, одновременно превращают её в крайне неэкономичную систему. Это приводит к перерасходу авиационного топлива и, как следствие, к увеличению эксплуатационных расходов и негативному воздействию на окружающую среду.

Каждому рейсу предписывается конкретный трек, отклонение от которого лимитировано разрешённым смещением вправо не более чем на две морские мили для обхода локальных зон турбулентности. Одновременно фиксируется эшелон, сохраняемый неизменным в пределах всего океанического участка, а также назначается число Маха с незначительным отклонением. Латеральное разделение установлено на уровне 60 морских миль, что автоматически достигается самой архитектурой OTS, тогда как продольный интервал определяется временной разницей пролёта общих опорных точек. Ключевым фактором, снижающим экономичность OTS, выступают струйные течения – узкие высокоскоростные воздушные потоки в тропосфере, дующие в основном с запада на восток на высотах 8–12 км со скоростями от 100 до 200 узлов. Для авиации данное обстоятельство имеет первостепенное значение: рейс, эксплуатирующий попутное течение, достигает существенной экономии времени и топлива, тогда как движение против такого течения влечёт значительные дополнительные затраты. Хотя OTS проектируется с учётом прогноза положения струй, всякий прогноз несёт в себе элемент неопределённости, и к моменту вылета фактическая ветровая обстановка может отличаться от расчётной, тогда как борт уже жёстко закреплён за своим треком, эшелоном и скоростным режимом.

Наиболее кардинальным вектором трансформации является полный отказ от системы организованных треков. Пандемия COVID-19 предоставила уникальный материал в рамках эксперимента NAT Tracks NIL: в марте 2021 года при значительном сокращении интенсивности движения диспетчерские центры Гандера и Шанвика в отдельные дни функционировали без публикации OTS предоставляли авиакомпаниям свободу прокладки произвольных траекторий [2]. Результаты указанного эксперимента создают предпосылки для перехода Северной Атлантики к полностью «бестрековой» модели, в рамках которой каждый рейс будет следовать по индивидуальной, оптимальной по ветру траектории. Определённые шаги в данном направлении уже реализованы: с 1 марта 2022 года все полёты на эшелонах ниже FL330 полностью освобождены от обязательства следования по OTS, а с 20 марта 2025 года упразднены устаревшие маршруты Blue Spruce Routes, которые предназначались для воздушных судов с ограниченным навигационным оборудованием и обеспечивали нахождение в зоне действия наземных радиомаяков через Гренландию и Исландию.

В основе предлагаемого подхода к оптимизации распределения треков лежит переход от реактивного управления, при котором диспетчеры реагируют на уже сложившуюся ситуацию, к проактивному планированию, где решение о маршруте, эшелоне и скорости принимается заблаговременно на основе многофакторного анализа. Ключевая идея состоит в трансформации процесса назначения треков из централизованного и унифицированного в децентрализованный и персонализированный, при котором каждый

рейс получает индивидуально подобранную траекторию, а общий уровень безопасности и пропускная способность воздушного пространства не снижаются, а возрастают. Например, тяжёлый широкофюзеляжный самолёт с полной коммерческой загрузкой на протяжённом маршруте может иметь иную оптимальную высоту по сравнению с таким же типом на короткой дистанции или при неполной загрузке.

Предлагаемая архитектура представляет собой интеллектуальную надстройку над существующей диспетчерской инфраструктурой и функционирует в три последовательных этапа. На первом этапе, за несколько часов до вылета, система осуществляет сбор и агрегацию всей доступной информации по каждому рейсу: тип ВС, взлётная масса, расчётное время вылета, наличный запас топлива, а также актуальный прогноз ветра и температуры на всех возможных эшелонах. На втором этапе для каждого рейса система перебирает все допустимые сочетания треков из текущей структуры OTS, разрешённых полётных уровней и скоростных режимов, оценивая для каждой комбинации ожидаемый расход топлива. Данный перебор выполняется не изолированно, а с учётом всей совокупности заявленных рейсов на данном временном интервале. На третьем этапе система выдаёт диспетчеру ранжированный перечень рекомендаций с указанием прогнозируемой экономии и предполагаемой загрузки каждого трека, после чего диспетчер принимает финальное решение. Предлагаемый подход существенно перераспределяет роли и зоны ответственности. Авиакомпании превращаются в активных участников процесса оптимизации, они предоставляют системе свои экономические приоритеты, технические ограничения и данные о загрузке, а система предлагает оптимальные варианты, которые перевозчик может принять или отклонить с соответствующим обоснованием. Диспетчерская служба переходит от функции единоличного «распределителя маршрутов» к роли «координатора и арбитра», получая уже сбалансированные рекомендации и сосредотачивая усилия на контроле нестандартных ситуаций. Пилот сохраняет финальное право изменить решение, однако уже не столько в части выбора маршрута, сколько в части корректировки скорости и эшелона в пределах согласованного коридора. По завершении каждого рейса система получает фактические данные о расходе топлива, реальном ветре, времени пролёта контрольных точек и замечаниях экипажа. Эти сведения сопоставляются с прогнозными, и при обнаружении систематических расхождений параметры модели пересматриваются. Так, если система устойчиво занижает расход топлива на определённых эшелонах в зимний период, алгоритм корректирует весовые коэффициенты. Таким образом, система накапливает опыт и со временем становится всё более точной, что приобретает особую значимость в условиях климатических изменений.

На основании проведённого анализа прогнозируется, что оптимизация распределения треков обеспечит статистически значимую экономию топлива в пределах от трёх до семи процентов на рейс в зависимости от сезона и конкретных маршрутных условий. Наиболее выраженный эффект ожидается в зимний период, когда струйные течения достигают максимальной интенсивности и отличаются наибольшей изменчивостью, а расхождение между фактическим ветром и прогнозным может быть существенным. В летний период экономия может снижаться до одного-двух процентов, однако даже такая, на первый взгляд, скромная величина при масштабах трансатлантических перевозок означает ежегодное сбережение миллионов килограммов топлива. Максимальный выигрыш получат рейсы с большим взлётным весом и рейсы в часы пиковой нагрузки, где конкуренция за выгодные треки наиболее высока. Напротив, рейсы с малым взлётным весом и в периоды низкой загрузки будут иметь более скромный выигрыш. Касательно продолжительности полёта ожидается, что оптимизация не приведёт к её значительному уменьшению – в среднем время изменится не более чем на плюс-минус две минуты, что укладывается в рамки естественной вариативности. Экологический эффект прямо пропорционален сэкономленному топливу, то есть каждый килограмм керосина даёт примерно 3,15 кг выбросов CO_2, поэтому экономия, например, ста тысяч тонн топлива в год означает сокращение выбросов более чем на триста тысяч тонн.

Таким образом, оптимизация распределения треков представляет собой не просто техническое усовершенствование, а необходимый этап эволюции в сторону более эффективной и экологически ответственной системы организации воздушного движения. Предложенная методология позволяет сочетать требования безопасности с экономической целесообразностью, и её практическая реализация, несмотря на все сопутствующие сложности, становится объективно неизбежной в условиях неуклонного роста цен на авиатопливо и ужесточения природоохранных нормативов.

Список литературы

1 North Atlantic Operations and Airspace Manual (NAT Doc 007) / ICAO. – V. 2026-1. – International Civil Aviation Organization, 2026. – 149 p.

2 NAT OPS Bulletin 2021-01. North Atlantic Tracks NIL Trial – COVID-19 Contingency / ICAO. – NAT SPG, 2021. – URL: https://share.google/jigOFTgmxJ6j9KTlQ (date of access: 12.09.2026).

УДК 504.75+629.32

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЙ ТРАНСПОРТ И ПОТЕНЦИАЛ ВЕЛОСИПЕДНОГО ДВИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЗАГАЗОВАННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ГОРОДОВ

Н. А. АХРАМЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В XXI веке стремительная урбанизация и концентрация населения в крупных городах привели к существенному обострению экологических проблем. Одной из наиболее значимых угроз для городской среды и здоровья населения стало сильное ухудшение качества атмосферного воздуха. По данным Всемирной организации здравоохранения, подавляющее большинство городских жителей планеты регулярно дышит воздухом, уровень загрязнения которого существенно превышает допустимые нормы. Главным деструктивным фактором выступает транспортный сектор из-за лавинообразного роста числа личных автомобилей с двигателями внутреннего сгорания. Традиционный автотранспорт является основным источником мелкодисперсных частиц, оксидов азота, угарного газа и летучих органических соединений в городской черте. Смог, ставший привычным элементом пейзажа мегаполисов, не только снижает качество жизни, но и провоцирует развитие тяжелых заболеваний, увеличивая нагрузку на систему здравоохранения. Традиционные методы расширения дорожной сети лишь усугубляют проблему, стимулируя новый спрос на автомобили. Улучшить экологическую обстановку может концепция «зеленая мобильность», в центре которой находится велосипедный транспорт. Переход к модели развития транспортной сети с хорошей велоинфраструктурой обладает уникальным эколого-экономическим потенциалом. В отличие от автомобилей, велосипед представляет собой абсолютно чистую альтернативу, способную коренным образом изменить экологический баланс внутри городов. Ключевые преимущества этого вида транспорта можно разделить на два фундаментальных аспекта: абсолютное отсутствие техногенной нагрузки на атмосферу и оптимизация городского пространства.

В г. Гомеле в новой градостроительной документации заложено смещение акцентов в сторону экологичного транспорта. Предусмотрено создание системы велопутей на основных транспортных выходах из Гомеля, а также обязательное проектирование полос для велосипедного движения во всех новых микрорайонах. На рисунке 1 представлен участок улицы в г. Гомеле после ремонта.



Рисунок 1 – Участок 3-й Витебской улицы, введенный в эксплуатацию в конце августа 2026 г. после ремонта. По две полосы в каждом направлении и справа дорожка для велосипедов и пешеходов

Велодорожка отделена от проезжей части, что повышает безопасность движения как велосипедистов, так и автотранспортных средств. На рисунке 2 представлены дорожка для велосипедистов и дорожка для пешеходов, идущие по этому участку улицы.



Рисунок 2 – Дорожки для велосипедистов и пешеходов (шириной приблизительно 2 метра)

Велосипед является весьма эффективным транспортным средством с точки зрения затрат энергии на километр пути. Он не требует ископаемого топлива и сложной инфраструктуры для зарядки. Современные города страдают от «пространственного кризиса»: огромные площади закатываются в асфальт под дороги и парковки. Один легковой автомобиль в движении или на парковке требует городского пространства в 10–15 раз больше, чем велосипед. На одном стандартном парковочном месте для автомобиля можно комфортно и безопасно разместить от 10 до 12 велосипедов. Как отмечено в [1], велотранспорт создает целый спектр преимуществ. Он обеспечивает мобильность для всех вне зависимости от возраста и дохода; способствует укреплению здоровья; не требует существенных затрат и выгоден экономически; экологичен, не производит шума и не требует больших площадей для передвижения и парковок.

Список литературы

1 **Коростелева, Н. В.** Развитие велоинфраструктуры в городах как способ снижения негативного влияния транспортной системы на городскую среду / Н. В. Коростелева, Е. В. Нестеренко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – № 45 (64). – С. 149–157.

УДК 629.322

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОВЕЛОСИПЕДОВ

Н. А. АХРАМЕНКО, А. П. ПАВЛЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Электровелосипед (e-bike) представляет собой один из самых перспективных и динамично развивающихся видов личного транспорта, успешно совмещающий экологичность классического велосипеда с эффективностью электрической моторной тяги (рисунок 1). В условиях стремительной урбанизации и перегруженности городских дорог поиск альтернативных способов мобильности стал приоритетом для

больших городов по всему миру. Обычный транспорт с двигателями внутреннего сгорания все чаще уступает позиции другим способам мобильного передвижения, среди которых электровелосипеды занимают лидирующее положение благодаря своей универсальности и доступности.



Рисунок 1 – Электровелосипед (e-bike)

Электровелосипеды эффективно используются коммерческими службами для доставки еды, экспресс-посылок и т. п. Они позволяют поддерживать среднюю скорость в 25–30 км/ч и быть независимыми от графиков общественного транспорта. Кроме этого, они обладают маневренностью в пробках, не имеют проблем с парковкой, позволяют оптимизировать маршрут передвижения.

Для оценки экономической эффективности электровелосипеда (e-bike) необходимо рассчитать общие затраты. В расчете на 1 километр пробега затраты на электротягу складываются из трех основных компонентов:

– расходы на электроэнергию;

– регулярное техническое обслуживание;

– амортизационный износ (в первую очередь деградация дорогостоящей аккумуляторной батареи).

Расходы на электричество (стоимость электроэнергии) – самая незначительная статья расходов при эксплуатации e-bike. Для расчета энергетической емкости батареи возьмем стандартную батарею городского электровелосипеда с характеристиками: напряжение $U = 48$ В, емкость $Q = 15$ А·ч. Тогда энергоемкость батареи составит

$$E = UQ = 48 \cdot 15 = 0{,}72 \text{ кВт·ч}.$$

Так как $P = A / t$ и $v = S / t$ [1], то работа, совершаемая двигателем,

$$A = Pt = PS / v,$$

где P – мощность двигателя; t – время движения; S – пройденный путь; v – скорость движения.

Работу, совершаемую двигателем на один километр пути, запишем в виде

$$A^* = A / S = P / v.$$

При зарядке батареи часть энергии теряется, поэтому

$$E = Wk_1,$$

где W – энергия, потребляемая при зарядке батареи; k_1 – коэффициент, показывающий, какая доля потребляемой энергии превращается в энергию батареи.

В работу, совершаемую двигателем, превращается не вся энергия, запасенная в батарее, поэтому

$$A = Ek_2,$$

где k_2 – коэффициент, показывающий, какая доля энергии батареи превращается в работу.

Тогда работа, совершаемая двигателем,

$$A = Wk_1k_2$$

и потребляемая энергия

$$W = A / (k_1k_2).$$

Потребляемая энергия на один километр пути

$$W^* = W / S = A / (k_1k_2S) = A^*/ (k_1k_2)$$

или

$$W^* = P/ (vk_1k_2).$$

Оценим потребляемую энергию на один километр пути при следующих условиях: мощность двигателя P = 250 Вт, скорость движения v = 25 км/ч, k_1 = 0,9, k_2 = 0,9:

$$W^* = 250 \cdot 3,6 / (25 \cdot 0,9 \cdot 0,9) = 44,5 \text{ Дж/км}.$$

При мощности двигателя P = 250 Вт, k_2 = 0,9 и энергоемкости батареи E = 0,72 кВт·ч максимальное время движения составит

$$t = 0,9 \cdot 0,72 / 250 = 2,592 \text{ ч}.$$

При скорости движения v = 25 км/ч и времени движения t = 2,592 ч пройденный путь будет равным

$$S = vt = 25 \cdot 2,592 = 64,8 \text{ км}.$$

Энергия, потребляемая при зарядке батареи,

$$W = E / k_1 = 0,72 / 0,9 = 0,8 \text{ кВт·ч}.$$

При тарифе на электроэнергию (примерно 0,1 дол. за 1 кВт·ч) один полный цикл зарядки стоит 0,08 дол. В пересчете на 1 км пробега расход равен 0,08 дол. / 64,8 км ~ 0,0012 (~0,12 цента).

Электровелосипед движется быстрее классического и имеет большую массу, что приводит к ускоренному износу расходных материалов. Основные статьи затрат – замена тормозных колодок, велосипедных цепей и звезд, а также покрышек. Годовые затраты на регулярную диагностику, смазку и покупку базовых расходных материалов обходятся по некоторым оценкам примерно в 100–150 дол. в год. Затраты на техническое обслуживание составят 0,033–0,05 дол. на 1 км.

Батарея – весьма дорогой компонент e-bike (составляет до 30–40 % стоимости всего байка). За свой жизненный цикл батарея обеспечит пробег около 40 000–50 000 км. При цене нового аккумулятора в 400 дол. скрытая стоимость износа составляет около 0,008–0,01 дол. на 1 км.

Механическая часть и рама электровелосипеда (без учета батареи) теряют в стоимости примерно 15–20 % в год. За 5 лет службы (1000 дол. стоимости механической части / 15 000 км) это добавит еще ~0,067 дол. на 1 км пробега.

Итоговый баланс стоимости 1 км пути составит 0,001 дол. (зарядка) + 0,01 дол. (амортизация АКБ) + 0,05 дол. (техническое обслуживание) + 0,067 дол. (амортизация механической части велосипеда) = 0,128 дол.

Проезд 1 км на бюджетном личном автомобиле с ДВС (с учетом бензина, дорогого ТО, страховки, налогов и сильной потери стоимости машины) оценивается в среднем 0,25–0,45 дол. Поэтому поездки на электровелосипеде выгоднее поездок на личном автомобиле в ~2–3,5 раза. И это делает его конкурентоспособным по сравнению с личным автотранспортом (особенно на небольших расстояниях, без дополнительной подзарядки).

Список литературы

1 **Трофимова, Т. И.** Курс физики / Т. И. Трофимова. – М. : Академия, 2006. – 560 с.

УДК 502.5:622(476)

ВОЗДЕЙСТВИЕ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ НА ЭКОЛОГИЮ И ПУТИ РЕШЕНИЯ ЭТОЙ ПРОБЛЕМЫ

П. Г. АХРАМЕНКО
Международный университет Федерации профсоюзов Беларуси (*МИТСО*)
Гомельский филиал

Минерально-сырьевой комплекс является одним из базовых секторов экономики Республики Беларусь, обеспечивающим экспортный потенциал (в первую очередь за счет калийных удобрений) и энергетическую безопасность страны. На территории Беларуси выявлено и разведано более 4000 месторождений различных полезных ископаемых, включая калийные и каменные соли, нефть, торф, строительные и стекольные пески, мел, доломиты и граниты [1]. Однако экстенсивный и интенсивный характер недропользования неизбежно влечет за собой значительные изменения в состоянии литосферы, гидросферы, атмосферы и биосферы.

Учитывая физико-географические особенности страны (равнинный рельеф, высокое залегание грунтовых вод, уязвимость водно-болотных угодий Полесья), антропогенная нагрузка от горнодобывающей промышленности требует пристального внимания.

Воздействие добычи полезных ископаемых на экосистемы Беларуси носит комплексный и зачастую кумулятивный характер. Его можно классифицировать по видам добываемого сырья и технологическим особенностям.

Добыча калийных солей. Калийная промышленность (ОАО «Беларуськалий», ОАО «Славкалий») сосредоточена преимущественно в Минской области (Старобинское месторождение). Экологические проблемы данной отрасли являются наиболее масштабными. Во-первых, это формирование огромных по площади и объему хранилищ для складирования галитовых отходов, что приводит к изъятию значительных территорий из хозяйственного оборота и изменению локальных ландшафтов [2]. Во-вторых, происходит загрязнение поверхностных и подземных вод хлоридами. Бассейн реки Случь исторически испытывает высокую антропогенную нагрузку из-за сброса минерализованных шахтных вод, что требует дорогостоящих мероприятий по водоподготовке и разбавлению [1]. В-третьих, подземная выемка руды вызывает деформацию земной поверхности (просадки), что негативно сказывается на гидрологическом режиме территорий, приводит к подтоплению земель, разрушению инфраструктуры и деградации почвенного покрова.

Нефтедобыча. Добыча нефти осуществляется преимущественно в Гомельской и Могилевской областях (Припятский прогиб). Основными экологическими рисками здесь являются загрязнение почв и подземных вод нефтепродуктами и высокоминерализованными пластовыми водами при авариях на трубопроводах или негерметичности скважин; образование нефтешламов; сжигание попутного нефтяного газа, сопровождающееся выбросами парниковых газов и загрязняющих веществ в атмосферу [3].

Добыча торфа и строительных материалов. Добыча торфа (преимущественно в Брестской и Гомельской областях) и открытых карьеров по добыче песка, гравия, мела и доломита приводит к прямому уничтожению экосистем. Карьеры нарушают естественный сток поверхностных вод, снижают уровни грунтовых вод на прилегающих территориях, что вызывает усыхание лесов и деградацию сельскохозяйственных угодий. Пыление отвалов и карьерных дорог ухудшает качество атмосферного воздуха. После завершения добычи торфяные залежи, лишенные растительного покрова, становятся подверженными ветровой эрозии и торфяным пожарам, что сопровождается колоссальными выбросами углекислого газа в атмосферу [4].

Минимизация экологического ущерба требует перехода от реактивного устранения последствий к проактивному управлению рисками на всех этапах жизненного цикла горнодобывающего предприятия. Комплекс решений должен включать технологические, биологические, мониторинговые и нормативно-правовые меры:

– *внедрение ресурсосберегающих и безотходных технологий.* Основным направлением в калийной и нефтяной отраслях является совершенствование технологий добычи и переработки. Для снижения объема твердых отходов необходимо расширять применение технологий закладки вырабо-

танного пространства твердеющими смесями на основе отходов обогащения (галоотходов). Это позволит не только уменьшить площадь хранилищ, но и предотвратить просадки земной поверхности [2]. В нефтедобыче особенно важно внедрение систем замкнутого водооборота для исключения сброса пластовых вод и применение современных методов сбора и утилизации попутного нефтяного газа;

– *совершенствование системы рекультивации нарушенных земель.* Рекультивация должна начинаться на этапе проектирования месторождения (технический этап) и продолжаться после завершения добычи (биологический этап). В соответствии с Законом Республики Беларусь «Об охране окружающей среды» и правилами проведения рекультивации нарушенные земли должны возвращаться в хозяйственный оборот или использоваться для создания рекреационных зон [5]. Особое внимание следует уделить биологической рекультивации с применением методов фиторемедиации – использования специфических растений (галофитов на засолённых территориях, гипернакопителей тяжелых металлов) для восстановления почвенного покрова и очистки грунтовых вод. Затопленные карьеры целесообразно адаптировать под объекты аквакультуры или рекреации с обязательным укреплением берегов и созданием буферных зеленых зон;

– *цифровизация и экологический мониторинг.* Эффективное управление экологическими рисками невозможно без современных систем мониторинга. Необходимо повсеместное внедрение ГИС-технологий и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для контроля за динамикой просадок земной поверхности, состоянием дамб хранилищ и выявления несанкционированных сбросов [6]. Создание цифровых двойников месторождений позволит моделировать миграцию загрязняющих веществ в подземных водах и прогнозировать экологические последствия до их наступления;

– *нормативно-правовое и экономическое регулирование.* Государственная политика в сфере недропользования должна стимулировать предприятия к снижению экологического следа. Требуется пересмотр ставок экологического налога за захоронение отходов и сброс загрязняющих веществ в сторону их повышения, чтобы сделать внедрение «зеленых» технологий экономически более целесообразным, чем уплата штрафов. Кроме того, государственные предприятия (ОАО «Беларуськалий», ОАО «Белоруснефть») должны в полной мере интегрировать принципы ESG (экологическое, социальное и корпоративное управление) в свою стратегию, что является обязательным условием для сохранения конкурентоспособности на международных рынках [3].

Таким образом, добыча полезных ископаемых в Республике Беларусь является важнейшим фактором экономического развития, однако сопряжена с серьезными экологическими проблемами, такими как деградация земель, загрязнение водных ресурсов хлоридами и нефтепродуктами, а также нарушение естественных ландшафтов. Решение этих проблем не может быть достигнуто исключительно запретительными мерами, так как это парализует экономику. Необходим системный переход к геоэкологически обоснованному недропользованию, базирующемуся на внедрении безотходных технологий, глубокой рекультивации нарушенных земель, цифровом экологическом мониторинге и жестком экономическом стимулировании природоохранной деятельности. Только комплексный подход позволит сохранить природный капитал Беларуси для будущих поколений, обеспечив баланс между промышленным развитием и экологической безопасностью.

Список литературы

1 Национальный доклад о состоянии окружающей среды и об использовании природных ресурсов Республики Беларусь в 2024 году / М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь. – Минск : Бел НИЦ «Экология», 2025. – 312 с.

2 **Русецкий, В. В.** Геоэкологические проблемы разработки калийных месторождений и пути их решения в условиях устойчивого развития / В. В. Русецкий, А. И. Ковалев // Горный журнал. – 2023. – № 4. – С. 88–94.

3 **Петров, С. В.** Экологические риски нефтедобычи в Припятском прогибе и методы их минимизации / С. В. Петров // Вестник Белорусского государственного технологического университета. Серия: Химическая технология и техника. – 2024. – № 2. – С. 45–51.

4 **Иванов, А. А.** Рекультивация торфяных месторождений: современные подходы и экологические аспекты / А. А. Иванов, Д. С. Смирнов // Природопользование и экология : сб. науч. тр. – Минск : БГУ, 2023. – С. 112–119.

5 Об охране окружающей среды : Закон Респ. Беларусь, 26 нояб. 1992 г., № 1973-XII : принят Палатой представителей 22 окт. 2020 г. : с изм. и доп. от 14 янв. 2024 г. // Эталон-Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2024.

6 **Сидоренко, В. Н.** Применение ГИС-технологий и данных дистанционного зондирования для мониторинга геологической среды в районах горнодобывающих предприятий / В. Н. Сидоренко // Геоинформатика. – 2025. – Т. 18, № 1. – С. 22–30.

УДК 625:621:311:681.5

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ И ЗАВИСИМОСТЬ ИХ ТОЧНОСТИ ОТ КАЧЕСТВА ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В. С. БАСЫРОВ
Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»), г. Москва, Российская Федерация

В условиях действия в России двухуровневого рынка электроэнергии, включающего оптовый рынок электроэнергии и мощности и розничный рынок электроэнергии, отклонение фактического потребления от заявленного влечёт штрафные санкции через механизм небалансов (в виде повышенных тарифов). Точность прогнозирования и учёта приобретает характер фактора не только технической, но и экономической устойчивости предприятия, электроэнергия как товар должна быть произведена и доставлена потребителю одновременно [1]. По имеющимся оценкам, внедрение прогнозных моделей позволяет снизить расходы на оплату электроэнергии на 15–20 % [1]. При годовом потреблении железнодорожной сети свыше 50 млрд кВт·ч [9] эффект от коррекции учётно-прогнозных процедур может исчисляться миллиардами рублей. С электропотреблением железной дороги в наибольшей степени связаны грузооборот и среднемесячная температура воздуха [1]. Почасовое энергопотребление отдельных станций крайне неравномерно, при среднем расходе 20,1 кВт·ч среднеквадратическое отклонение достигает 43,75 кВт·ч, а наибольшее влияние оказывают температура наружного воздуха и облачность [2]. Классические методы, опирающиеся на экспертные оценки и удельные нормы расхода, такую стохастичность тяговой нагрузки как правило в полной мере обработать не позволяют [1].

Обзор методов прогнозирования электропотребления

Традиционные статистические модели – авторегрессионное интегрированное скользящее среднее (ARIMA) и его сезонная модификация (SARIMA) на резкопеременных графиках тягового потребления работают не уверенно. В сопоставительном эксперименте базовая модель ARIMA дала среднюю абсолютную ошибку (MAPE) 12,06 % и не смогла воспроизвести нелинейные скачки ряда (свойственные при внезапных изменениях графика движения или погодных скачках) [3]. По этой причине основное развитие получают нейросетевые модели, многослойные сети (обученные на статистических массивах) обеспечивают точность прогноза порядка 4,5 % [1]. Гибридная архитектура ARIMA-LSTM, в которой за линейную составляющую ряда отвечает ARIMA, а за флуктуации – рекуррентная сеть с долгой краткосрочной памятью (LSTM), уменьшила среднеквадратическую ошибку (RMSE) с 49,90 у модели ARIMA до 7,35 [3]. Специфические для железнодорожного транспорта подходы, такие как техноценологический метод на базе аппарата рангового H-распределения и методика имитационного моделирования, удерживают отклонение от показаний счётчиков в пределах 1,9 %, однако предъявляют жёсткие требования к полноте исходных данных [1].

Среди рекуррентных архитектур заметное место занимают сети LSTM и управляемый рекуррентный блок (GRU), преодолевающие проблему исчезающего градиента и сохраняющие долгосрочные зависимости в рядах [4]. Не менее важна и предварительная обработка данных, так метод главных компонент (PCA) позволяет снизить размерность входного массива (сохраняя около 87 % вариативности [5] и устраняя мультиколлинеарность), а комбинация вейвлет-преобразования с нейроэволюционными алгоритмами успешно работает в задачах краткосрочного прогнозирования нагрузки энергосистем [6]. Наилучших результатов добиваются гибридные архитектуры с механизмом внимания, модель на основе сверточной нейронной сети (CNN), LSTM и двунаправленной LSTM (BiLSTM) превосходит базовые конфигурации CNN-LSTM и другие сравниваемые схемы [7]. При этом общий для большинства исследований вывод скромнее рекламных оценок, решающим фактором точности остаётся качество входных данных, а не сложность архитектуры [8].

Качество первичных измерений как ограничивающий фактор точности прогноза

Эффективность любой прогнозной модели определяется качеством входных измерений. Если первичный измерительный канал содержит систематические погрешности, нейросеть обучается на искажённой выборке и воспроизводит искажения в прогнозе. Складывается замкнутый контур, чтобы сни-

зить потери, нужно прогнозировать, чтобы прогнозировать, нужны точные измерения, точные измерения невозможны без учёта метрологических факторов, которые классические модели прогнозирования, как правило, не учитывают.

Основными источниками систематических погрешностей автоматизированного информационно-измерительного комплекса коммерческого учёта электроэнергии (АИИС КУЭ) на железнодорожной инфраструктуре служат измерительные трансформаторы тока и напряжения. Их погрешность зависит от класса точности (для коммерческого учёта, как правило, 0,2S / 0,5S), от нагрузки вторичной цепи и режима первичной сети. Тяговая нагрузка нелинейна, резко переменна, что в ряде случаев дополнительно искажает работу измерительных преобразователей. В совокупности допускаемая погрешность АИИС КУЭ для коммерческого учёта, как правило, нормируется на уровне порядка 3 %, однако на отдельных объектах фактическая погрешность канала может быть выше.

Механизм переноса погрешности в прогноз прост. Систематическая составляющая ошибки измерений входит в обучающую выборку вместе с истинной зависимостью «факторы – потребление», и модель воспринимает смещение как закономерность, воспроизводя его в каждом прогнозе. Потери и пропуски данных сокращают объём выборки и снижают её репрезентативность. Поэтому дальнейшее усложнение архитектуры без улучшения первичного измерительного контура, как правило, даёт лишь ограниченный прирост точности.

Количественно эффект оценивается несложно. При погрешности 3 % прогноз годового потребления железнодорожной инфраструктуры ~51 млрд кВт·ч (2024 г. [9]) сопровождается абсолютной ошибкой в ~1,5 млрд кВт·ч. Средняя цена электроэнергии в России составляет примерно ~9 руб./(кВт·ч), тогда ошибка прогноза эквивалентна ~13,5 млрд руб. в год. Для железнодорожной инфраструктуры каждый процент снижения такой ошибки транслируется в значительную экономию.

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие выводы.

1 Интеллектуальные методы (нейросетевые, гибридные и ансамблевые архитектуры) обеспечивают существенное снижение прогнозной ошибки по сравнению с классическими подходами. Оценка экономического эффекта от внедрения прогнозных моделей составляет 15–20 % [1], а по отдельным метрикам достигает многократного выигрыша, MAPE снижается с 12,06 у модели ARIMA до 1,52 % у гибрида ARIMA-LSTM [3].

2 Потенциал этих методов жёстко ограничен достоверностью первичных измерений АИИС КУЭ, систематическая погрешность канала переносится в обучающую выборку и воспроизводится в прогнозе.

3 При погрешности канала 3 % ошибка прогноза годового потребления на железнодорожной инфраструктуре достигает около 1,5 млрд кВт·ч, что по средней цене эквивалентно примерно 13,5 млрд руб. в год.

Разрыв замкнутого контура «измерение – прогноз – потери» возможен по двум направлениям: метрологическая модернизация измерительного контура либо алгоритмическая компенсация его погрешностей. Программы внедрения машинного обучения целесообразно разрабатывать совместно с программами повышения точности учёта, только тогда цифровизация даст ожидаемый экономический эффект.

При этом проблема точности учёта выходит за рамки чисто метрологической задачи. Эффективность любого прогноза напрямую определяется достоверностью первичных измерений: если измерительный канал систематически искажает фактическое потребление, прогнозная модель воспроизводит эти искажения и тем самым усиливает экономические потери. Следовательно, точность учёта приобретает статус фактора энергетической безопасности железнодорожного транспорта.

Список литературы

1 Моделирование и прогнозирование процессов электропотребления на железнодорожном транспорте : монография / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Н. В. Раевский, Д. А. Яковлев ; под ред. А. В. Крюкова. – Иркутск : ИрГУПС, 2007. – 114 с. (Деп. в ВИНИТИ 11.01.2007, № 19-В2007).

2 **Андреева, М. А.** Анализ влияния климатических факторов на потребление электроэнергии предприятиями в неперевозочных видах деятельности ОАО «РЖД» / М. А. Андреева // БРНИ. – 2024. – Вып. 3. – С. 34–44. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vliyaniya-klimaticheskih-faktorov-na-potreblenie-elektroenergii-predpriyatiyami-v-nepere-vozochnyh- vidah- deyatelnosti-oao (дата обращения: 12.09.2026). – DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-34-44.

3 Peak electrical energy consumption prediction by ARIMA, LSTM, GRU, ARIMA-LSTM and ARIMA-GRU approaches / A. A. Pierre, S. A. Akim, A. K. Semenyo, B. Babigg // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 12. – Art. 4739. – DOI: 10.3390/en16124739.

4 Forecasting electricity consumption by LSTM neural network / I. U. Rakhmonov, N. N. Niyozov, V. Ya. Ushakov [et al.] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2023. – Vol. 334, № 12. – P. 125–133.

5 Прогнозирование электропотребления с использованием метода главных компонент (PCA) / И. У. Рахмонов, В. Я. Ушаков, Н. Н. Ниёзов, Н. Н. Курбонов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 12. – С. 198–209.

6 **Amjady, N.** Short-term load forecasting of power systems by combination of wavelet transform and neuro-evolutionary algorithm / N. Amjady, F. Keynia // Energy. – 2009. – Vol. 34, № 1. – P. 46–57.

7 An attention-based CNN-LSTM-BiLSTM model for short-term electric load forecasting in integrated energy system / K. Wu, J. Wu, L. Fend [et al.] // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2021. – Vol. 31, № 1. – Art. e12637.

8 **Hong, T.** Global energy forecasting competition 2012 / T. Hong, P. Pinson, S. Fan // International Journal of Forecasting. – 2014. – Vol. 30, № 2. – P. 357–363.

9 Отчёт об устойчивом развитии ОАО «РЖД» за 2024 год : приложение «Энергоэффективность». – М. : РЖД, 2025. – URL: https://sr2024.rzd.ru/ru/annexes/energy-efficiency (дата обращения: 12.09.2026).

УДК 534.286.2:534.833.532:534.833.534

ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ШУМОВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТА

С. Н. БУХАРОВ, А. С. ТУЛЕЙКО, В. В. КОЖУШКО
Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель

Задачи снижения уровня шума в кабинах транспорта актуальны и требуют применения современных методов и подходов с учётом экологической безопасности и комфорта. Волокнистые и пористые акустические композиты наиболее широко распространены для решения задач по уменьшению уровня звукового давления [1]. Механизм звукопоглощение таких материалов объясняется внутренним трением воздуха со структурой композита. Анализ спектров звукопоглощения и уровня шумов показывает, что область низких частот вызывает наибольшие сложности ввиду относительно низкого коэффициента звукопоглощения материалов и, соответственно, необходимости в использовании значительного объёма композитов для решения поставленных задач. Ограничения на допустимую толщину применяемых звукопоглощающих материалов требуют поиска альтернативных подходов. Акустические метаматериалы представляют собой один из возможных путей в решении указанной проблемы. Последние десять лет проявляется активность по исследованию звукопоглощения метаматериалами, где геометрия структурных элементов составляет небольшую часть по отношению к длине акустической волны. Наиболее известные примеры связаны с резонаторами Гельмгольца и их дальнейшим развитием в виде лабиринтных канальных структур. Таким образом, в метаматериалах реализуется резонансный механизм взаимодействия, и геометрия отдельного структурного элемента определяет спектральную зависимость с характерными максимумами или областями значительного звукопоглощения при размерах значительно меньших длины волны.

Преимущество метаматериалов для решения задач по эффективному звукопоглощению связывают с возможностью на макроуровне реализовать конструктивные особенности, обеспечивающие решения для установленной полосы частот с целью селективного уменьшения в спектре звукового давления. Разработка пространственных моделей звукопоглощающих метаматериалов представляет интерес ввиду возможности параметризации модельных конструкций для поиска оптимальной геометрии и в то же время проведения натурных испытаний. Развитие и снижение стоимости трёхмерной печати делают процесс подготовки экспериментальных модельных образцов доступным и распространённым, о чём свидетельствует число цитируемых публикаций по данному направлению исследований [2]. Интерес к данной теме со стороны научного сообщества огромен благодаря возможности проводить исследования и моделирование с целью расширения диапазона частот, в котором выполняются условия по селективному звукопоглощению и/или звукоизоляции.

Важной особенностью пористых и волокнистых акустических композитов является хорошая продуваемость, в противном случае материал работает как звукоизолирующий с характерным спектром из локальных минимумов пропускания. В рамках настоящей работы спроектированы модельные образцы звукопоглощающих метаматериалов, представляющие собой диски диаметром 100 мм с лабиринтными каналами, соединяющими противоположные плоские поверхности.

Обусловленные геометрией структурные элементы образовали три группы, из 16, 12 и 8 подобных элементов, незначительно отличающиеся длиной и геометрией, и один центральный элемент, таким образом, общее число каналов равно 37. Геометрические отличия между группами элементов позволя-

ют расширить полосу звукопоглощения. Модельные образцы звукопоглощающих метаматериалов изготовлены методом 3D печати с использованием биоразлагаемого PLA-филамента с номинальной температурой плавления 150–160 °С. Отметим, что наличие характерной технологической шероховатости в каналах метаматериала в данном случае является преимуществом по сравнению с идеально гладкой стенкой в моделях. Исходная модель была построена для образца толщиной 12 мм, остальные получены масштабированием по толщине с шагом 2 мм. Поскольку изготовление каналов диаметром менее 2 мм может сопровождаться образованием технологических дефектов структуры и формированием глухих отверстий, что является нежелательным, то минимальная толщина модели составляет 10 мм. Измерения коэффициента звукопоглощения в полосе частот от 50 до 1600 Гц проводили в импедансной трубе 4206 (Bruel&Kjaer) с внутренним диаметром 100 мм в соответствии с установленной программой испытаний. Результаты измерений представлены на рисунке 1. Показано, что коэффициент звукопоглощение метаматериалов имеет выраженный максимум. Так как модельные образцы отличаются масштабным коэффициентом вдоль оси диска, это отражается на положении максимума звукопоглощения, сдвигающегося по частоте влево с 1260 Гц для диска толщиной 10 мм до 1000 Гц для диска толщиной 18 мм. Абсолютное значение локального максимума коэффициента звукопоглощения для всех образцов превышает 0,93, а для образца толщиной 18 мм достигает 0,996 на частоте 1 кГц. Ширина области по уровню половины от максимума составляет почти 400 Гц. Приведённое для сравнения звукопоглощение пенополиуретана толщиной 25 мм в обозначенном диапазоне демонстрирует монотонно возрастающую зависимость со значением звукопоглощения 0,2 на частоте 1 кГц.

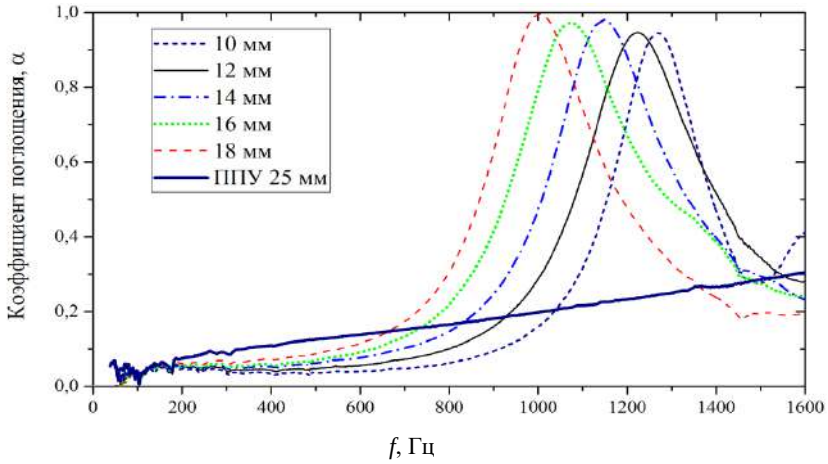


Рисунок 1 – Измеренное звукопоглощение модельных образцов метаматериалов с указанной толщиной. Сплошная жирная линия показывает поглощение пенополиуретана толщиной 25 мм

Таким образом, по результатам проведённых испытаний установлено влияние внутренней геометрии метаматериала на положение максимума звукопоглощения. Предложенные метаматериалы могут служить основой для дальнейшего решения задач по снижению уровня звукового давления в кабинах транспорта посредством избирательного звукопоглощения. Подход в решении позволяет построить модели метаматериала, изготовить их методом 3D печати, выполнить испытания натурных образов, провести корректировку геометрических параметров и повторить процедуру для решения задачи по оптимизации спектра звукопоглощения для конкретного применения. Следует отметить, что для внедрения разработки требуется переход от технологий трёхмерной печати на текущем этапе их развития, поскольку они не позволяют производить звукопоглощающие метаматериалы в необходимых промышленных объемах.

Работа выполнена в рамках мероприятия задачи 3 подпрограммы 4 Государственной программы «Наука для экономики и общества», договор № 2026-26-224 от 17.04.2026 г.

Список литературы

1 Акустические композиты и шумопонижающие конструкции. Часть I. Экологически безопасные компоненты и нанонаполнители / С. Н. Бухаров, В. П. Сергиенко, В. В. Кожушко [и др.] // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – Т. 7, № 1. – С. 6–22.

2 A comprehensive review of acoustic metamaterials: Applications and challenges for lightweight noise control in large-scale transportation / D. Yao, J. Zhang, J. Lei [et al.] // Materials & Design. – 2025. – Vol. 260. – Art. 115002.

УДК 699.844

ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

П. С. ВЕРБИЦКИЙ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Энергетическая безопасность является составляющей национальной безопасности, а экологическая безопасность – важнейшим фактором развития устойчивой жизнедеятельности. Энергетическая и экологическая безопасность приобрели первостепенное значение для Беларуси в связи с нестабильными климатическими условиями, длительным отопительным сезоном и значительным диапазоном колебаний температур, что напрямую отражается на энергопотреблении в зданиях. Более 35 % всех энергоресурсов потребляется жилым сектором Беларуси; доля тепловой энергии, потребляемой населением, достигает 41 %. Одним из перспективных направлений, сочетающих экономические факторы, энергосбережение и экологию, является производство эффективных звукоизоляционных материалов и панелей на основе вторичного сырья [1].

С точки зрения экологической безопасности производство тепло- и звукоизоляционных материалов решает две основные задачи. Во-первых, это снижение шумового загрязнения, которое является одним из главных загрязнителей городов, ведущим к повышению уровня стресса и риску сердечно-сосудистых заболеваний у населения. Такие материалы устанавливают в жилых и офисных зданиях, вдоль автомобильных и железных дорог в качестве звукозащитных экранов и в производственных цехах для защиты работников. Во-вторых, экологичность производства. Перспективным направлением является использование панелей из древесных отходов, вторичного текстиля и др. [2]. Перспективной разработкой Республики Беларуси являются льняные утеплители и шумоизоляторы. Они полностью биоразлагаемы и безопасны. Использование местных материалов также сокращает логистические расходы и выбросы CO_2 от транспорта.

Современные исследования в области акустических материалов все больше смещаются в сторону использования переработанных отходов и возобновляемого сырья. Это обусловлено как экологическими соображениями, так и экономической целесообразностью: многие промышленные и бытовые отходы обладают структурой, благоприятной для звукопоглощения, и при правильной переработке могут стать полноценной заменой первичным материалам.

Резиновая крошка – один из наиболее изученных вторичных компонентов. Исследования показывают, что при постоянном количестве полиуретанового связующего более мелкие резиновые частицы формируют композиты с более высокой пористостью, что приводит к снижению модуля упругости, но повышает тепло- и звукоизоляционные свойства. Комбинация мелкой и крупной резиновой крошки обеспечивает сбалансированные характеристики, сочетая хорошую тепло- и звукоизоляцию с сохранением высокого модуля упругости. Среди исследованных толщин оптимальной признана 15 мм, обеспечивающая наилучшее сочетание механической прочности и индекса изоляции воздушного шума. Резиновая крошка также используется в составе битумных мастик для напыляемой шумоизоляции, где она способствует поглощению и рассеиванию вибраций [3].

Переработанные текстильные волокна также находят применение в производстве акустических панелей. Исследования показывают, что композиты на основе отходов текстильной промышленности демонстрируют регулируемые акустические характеристики: увеличение содержания текстильных волокон повышает звукопоглощение за счет формирования более пористой структуры. Гибридные образцы с многослойной губчатой структурой показывают коэффициент шумоподавления NRC до 0,65 и улучшение звукового давления более чем на 20 дБ в среднечастотном диапазоне. Смешанные волокна из полиэстера и хлопка превосходят по акустическим характеристикам однокомпонентные. Микроструктурный анализ таких материалов выявляет высокопористую сетчатую структуру с пористостью, превышающей 85 %, что способствует как тепловой изоляции, так и звукопоглощению. В России уже налажен выпуск шумоизоляционной нетканой продукции из регенерированного волокна на основе отходов текстильной и легкой промышленности.

Стеклошарики представляют еще одно перспективное направление. Эти сферические частицы из натриево-кальциевого или боросиликатного стекла, получаемые высокотемпературной обработкой, могут использоваться в качестве наполнителя композиционных звукопоглощающих панелей. Основная сложность заключается в том, что открытые публикации по акустическому применению

стеклошариков пока немногочисленны и носят преимущественно патентный характер. Тем не менее сама идея использования полых стеклянных микросфер в качестве легкого и жесткого наполнителя, способного создавать дополнительные границы раздела сред для рассеяния звуковой энергии, представляется перспективной [4].

Общим для всех перечисленных инновационных направлений является стремление замкнуть технологический цикл: отходы одного производства становятся сырьем для другого, а конечный продукт сохраняет или даже улучшает акустические характеристики по сравнению с традиционными материалами. Это особенно актуально в условиях ужесточения экологических требований и роста цен на первичное сырье. Однако коммерциализация таких разработок пока сдерживается нестабильностью свойств вторичного сырья, сложностями сортировки и подготовки, а также отсутствием устоявшихся нормативных баз для сертификации продукции из переработанных.

Таким образом, производство шумоизоляционных материалов [5, 6] и панелей вносит вклад в решение макроэкономических и государственных задач. В контексте энергетической безопасности оно является важным элементом программы по энергосбережению, снижая потребление импортируемых энергоносителей через повышение эффективности зданий и сооружений. Решением проблемы шумового загрязнения может быть разработка материалов на основе возобновляемого сырья и переработки отходов, что значительно уменьшает нагрузку на окружающую среду. Дальнейшее развитие данного направления, ориентация на инновационные и зеленые технологии позволят Беларуси не только укреплять собственную безопасность, но и занимать устойчивые позиции на международном рынке экологически чистой строительной продукции.

Список литературы

1 **Вербицкий, П. С.** Шумоизоляционные материалы: безопасность и эффективность применения / П. С. Вербицкий, Н. А. Подвойский // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. пятилетке качества, Гомель, 20–21 нояб. 2025 г. : в 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2025. – 196–197.

2 **Ефимчик, К. В.** Рециклинг полимерных композиционных материалов: современное состояние и перспективы развития (обзор) / К. В. Ефимчик, Е. Ф. Кудина // Горная механика и машиностроение. – 2023. – № 2. – С. 75–86.

3 **Элькин, Ю. И.** Возможность использования продуктов переработки шин (крошка, плиты) при изготовлении панелей акустических экранов / Ю. И. Элькин, Р. А. Виноградов // Noise Theory and Practice, 2025. – Т. 11, № 3 (42). – С. 20–31.

4 **Байков, А. В.** Упругие параметры синтактовых композитов на основе полых стеклянных микросфер : дисс. … канд. техн. наук : 1.4.7 / А. В. Байков. – М., 2023. – 108 л.

5 Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 годы (в редакции Постановления СМ РБ от 28.12.2023 № 959) // Департамент по энергоэффективности. – URL: https: //energoeffect. gov.by/programs/20210302_program/ program-2021-2025-687-2 (дата обращения: 22.08.2025).

6 Акустические композиты и шумопонижающие конструкции. Ч. I. Экологически безопасные компоненты и нанонаполнители / С. Н. Бухаров, В. П. Сергиенко, В. В. Кожушко [и др.] // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – Т. 7, № 1. – С. 6–22.

УДК 621.317.33

СТУДЕНЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ ПРИБОРОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ

В. Н. ГАЛУШКО, И. Л. ГРОМЫКО, В. В. САВИЦКАЯ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В рамках научно-исследовательской работы БелГУТа «Цифровые модели трансформаторов и программно-аппаратный комплекс их диагностики», реализуемой руководством университета с целью поддержки талантливой молодежи, разрабатываются приборы диагностики обмоток электрических машин и трансформаторов, которые проверяются и внедряются на промышленных предприятиях.

Начало студенческих научных разработок макетов приборов для диагностики трансформаторов было положено студентами БелГУТа Глебом Горошко и Владиславом Рамихановым, которые стали победителями 15-го юбилейного республиканского молодёжного проекта «100 идей для Беларуси». В 2025 году их проект «Цифровые двойники трансформаторов и программно-аппаратный комплекс для их диагностики» признан лучшим из представленных в номинации «Энергетика, в том числе атомная энергетика и энергоэффективность». Затем состоялись успешные презентации разработок и испытания макетов приборов для диагностики электрических двигателей, трансформаторов и реле в Оршанской дистанции сигнализации и связи, моторвагонном депо, Минском электротехниче-

ском заводе имени В. И. Козлова, ОАО «Белэнергоремналадка» и других предприятиях энергетической и транспортной отраслей. Студенты-разработчики активно выступали и демонстрировали практические возможности приборов; вели дискуссию на высоком уровне; отвечали на вопросы специалистов; обсуждали предлагаемые доработки для различных условий.

Основные выводы по итогам встреч с производственными коллективами: разработанная линейка приборов в целом получила положительную оценку путем проверки на реальном оборудовании, высказано предложение о целесообразности применения в КИПе (служба ремонта и обслуживания контрольно-измерительных приборов, трансформаторов, реле, электродвигателей и иного оборудования), а также при производстве трансформаторов. Применение данных приборов значительно облегчит работу по определению дефектов, т. к. они универсальны, просты в эксплуатации и относительно других аналогичных приборов имеют низкую стоимость.

Опытными мастерами и инженерами предприятий высказаны пути улучшения и дальнейшего развития исследований. В частности, предложены более высокий класс защиты от влаги, логирование (автоматическая фиксация событий и сохранение этой информации в файлы), поверки приборов перед измерениями, совмещения функций многих приборов в одном. Предложения реализуются в новой линейке приборов, которая финансируется в рамках университетского гранта по поддержке творческих разработок студентов.

Представим подробнее возможности представленных макетов приборов.

ГРОМ-12. Предназначен для обнаружения короткозамкнутых витков и обрывов в обмотках электротехнических устройств (в отключенном состоянии).

В основе данного устройства лежит универсальный LC-генератор, который состоит из конденсатора, электронного сопротивления, автогенератора и управляющего электронным сопротивлением микропроцессора. В роли катушки выступает обмотка электротехнического устройства. При определенной настройке электронного сопротивления в LC-генераторе происходят колебания, говорящие о целостности обмотки.

При возникновении дефекта (межвиткового короткого замыкания или обрыва обмотки) данные колебания прекращаются и подается через светодиоды сигнал о наличии межвиткового короткого замыкания или обрыва. Прибор обладает встроенной памятью для наиболее распространенного оборудования с целью удобства проводимых испытаний. Преимущества данного программно-аппаратного комплекса заключается в простоте конструкции, простоте использования, универсальности и низкой стоимости.

ГРОМ-21. Предназначен для обнаружения короткозамкнутых витков обмоток электротехнических устройств в режиме реального времени (в работающем состоянии) с помощью сверточных нейронных сетей.

Данный программно-аппаратный комплекс измеряет на обмотках напряжения, токи, активную мощность и коэффициент мощности, представляет их в виде графических зависимостей от времени, преобразует данные зависимости в изображения и осуществляет обнаружение короткозамкнутых витков (через распознавание изображений) с помощью сверточных нейронных сетей.

Преимущества данного программно-аппаратного комплекса заключаются в том, что его можно использовать без отключения от сети испытуемого устройства и выявлять межвитковые короткие замыкания на ранних стадиях.

FRABEL. Предназначен для полной диагностики электротехнических устройств (в отключенном состоянии), содержащих обмотки и сердечник, с использованием метода частотных характеристик (FRA) и сверточных нейронных сетей.

Анализ частотных характеристик может быть разбит на три частотных диапазона: в нижнем частотном диапазоне определяющее влияние оказывает магнитная система трансформатора, в среднем – взаимодействие между обмотками, а в области высших частот влияние оказывают измерительные кабели. В основе данного метода лежит метод трех вольтметров, который используется для построения частотных характеристик электрических цепей. Полученные данным методом частотные характеристики (импедансная и фазочастотная) преобразуются в изображения, которые затем распознаются с помощью сверточных нейронных сетей. Этот программно-аппаратный комплекс позволяет обнаружить дефекты обмотки или сердечника устройства, а также выявить предотказные состояния изоляции.

BLDC. Прибор диагностики BLDC-двигателей и контроллеров. Универсальный макет прибора в составе диагностической системы предназначен для диагностики датчиковых и бездатчиковых

BLDC-приводов и их контроллеров. Основными дефектами, выявляемыми прибором, являются межвитковые замыкания, обрывы фаз обмоток, работоспособность контроллера.

Разработки студенческого НИРСа позволят оснастить отечественными диагностическими приборами энергетические и транспортные предприятия Республики Беларусь. Положительными сторонами приборов являются их простота в использовании, низкая стоимость относительно их зарубежных аналогов, быстрота обнаружения различных дефектов оборудования, вывод на дисплей вида дефекта. Наиболее ценный вывод – студенты видят пользу своего труда и применения полученных в университете знаний.

УДК 621.317.33

МЕТОДИАКА ДИАГНОСТИКИ БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В. Н. ГАЛУШКО, С. А. МОЖАЕВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Бесщёточные двигатели постоянного тока нашли своё широкое применение в электротранспортной технике. Электросамокаты, электровелосипеды и многое другое – все это объединяет высокая надёжность, которую получили при помощи BLDC-привода.

Однако, как и любое устройство, они также подвержены неисправностям. Диагностика таких неисправностей представляет определённые трудности, поскольку требует специализированного оборудования для подачи питания и формирования управляющих импульсов.

Разработанный макет прибора предполагается использовать для диагностики BLDC-приводов различных устройств и является универсальным решением.

Диагностический стенд представляет собой функциональное устройство, которое условно можно разделить на три основные части:

1 Силовую часть, которая представлена импульсным источником питания.

2 Управление, реализуемое контроллером.

3 Орган управления в виде потенциометра.

Силовая часть. Основой энергетической части стенда является высокоэффективный импульсный источник питания, который выполняет функцию замены штатного аккумулятора. В отличии от стандартной батареи, он обеспечивает стабилизированное выходное напряжение с низким уровнем пульсаций, что критически важно для корректной работы контроллера.

Система управления. Управляющим элементом стенда, который формирует фазные импульсы, является контроллер (рисунок 1), который рассчитан на постоянное напряжение питания 36–48 В и номинальную мощность в 350 Вт.

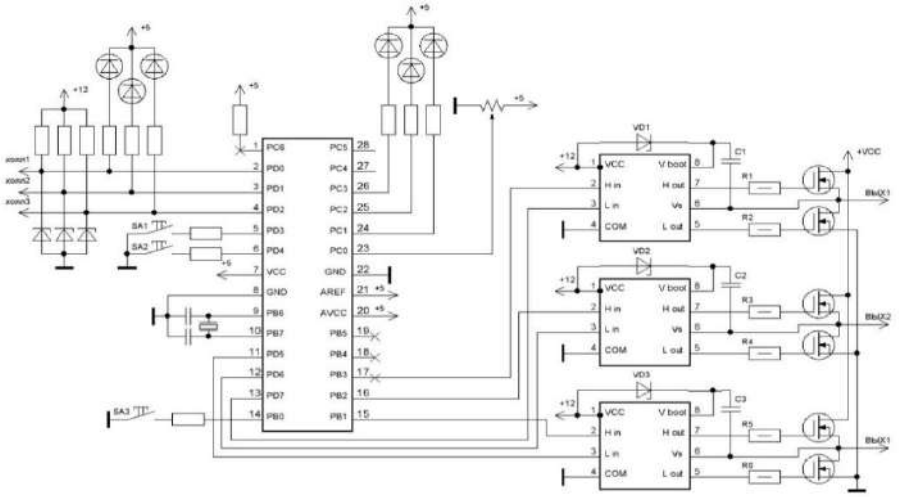


Рисунок 1 – Принципиальная схема контроллера

В основе работы контроллера используется трёхфазный мостовой инвертор, собранный по схеме «шесть ключей», которые образуют три плеча (верхний и нижний ключ на каждую фазу). Данное решение позволяет реализовать ШИМ-модуляцию с частотой до 20 кГц.

Наличие этих транзисторов обеспечивает высокий КПД инвертора (до 97–98 % в рабочем диапазоне) и позволяет коммутировать токи до 18 А без критического перегрева за счёт использования технологии синхронного выпрямления, при этом нижние ключи открываются в паузах для шунтирования обратных диодов, что дополнительно снижает тепловые потери на 15 %.

Стандартный алгоритм работы с обратной связью по сигналам трёх цифровых датчиков Холла обеспечивает детерминированный пуск с максимальным моментом на нулевой скорости. Одной из немаловажных особенностей этого контроллера является двухрежимное управление двигателем.

Резервный алгоритм определения положения ротора по противо-ЭДС в неактивной фазе использует метод сравнения потенциала висячей фазой с искусственной средней точкой, формируемой резистивным делителем. Переключение между режимами происходит при обнаружении ошибки датчиков Холла за 5 оборотов. Наличие такой особенности позволяет диагностировать двигатели с неисправностями датчиков.

Система управления. Функция задания режима работы реализована через прецизионный переменный резистор, подключённый к выводу контроллера. В электротранспорте в качестве датчика положения ручки газа обычно используется потенциометр или датчик Холла с тремя проводами.

При повороте ручки потенциометра постоянное напряжение на сигнальном входе изменяется от 1 до 4 В. Это напряжение микроконтроллер интерпретирует как задание скорости.

Такой способ регулирования обеспечивает ряд преимуществ, таких как плавность регулирования, точность и простота в использовании.

Диагностика. Для дефектного электродвигателя при повышении оборотов на дисплее блока питания будет виден резкий скачок потребления тока, что соответствует резкому повышению температуры. Изменяя частоту вращения выла с помощью потенциометра на холостом ходу также можно определить износ подшипников (вибродиагностика). Контроль с помощью показаний амперметра на дисплее блока питания, позволяет выявить скрытые проблемы. Бездефектный 350-ваттный привод скутера на холостом ходу потребляет, как правило, не более 1,5 А.

Поскольку зачастую диагностика выполняется на холостом ходу, контроллер позволяет проверять и более мощные электродвигатели (номинальной мощностью до 500 Вт и номинальным напряжением до 48 В).

Технология применения предусматривает комплексное использование данного прибора с учетом уже имеющихся авторских разработок. Представленная разработка выявляет межвитковые замыкания и обрывы фазы обмоток. С помощью индикатора межвитковых замыканий [1] существует дополнительная возможность определения обмотки поврежденной фазы.

Дальнейшее развитие проекта предполагает создание диагностической системы, позволяющей помимо уже представленных возможностей, выявить предотказное состояние эмалевой изоляции обмоток BLDC-привода на основе авторского метода [2, 3]. Технология обнаружения предотказных дефектов BLDC-двигателей основана на использовании импедансной и фазочастотной характеристик и является развитием методики [4], где с помощью метода «трех вольтметров» рассчитывается модуль и аргумент комплексного сопротивления в режиме холостого хода (XX), в диапазоне частот от 0 до 100 кГц, и для обнаружения коротких замыканий сравниваются частотные характеристики BLDC-двигателей в дефектном и бездефектном состояниях.

Представленный в материале универсальный макет прибора в составе диагностической системы позволяет диагностировать датчиковые и бездатчиковые BLDC-приводы и контроллеры. Основными дефектами, которые позволяет выявляемыми прибором, являются обрывы фаз обмоток, межвитковые замыкания, работоспособность контроллера, а при использовании разработанного авторами метода на основе частотного анализа можно выявлять предотказные состояния обмоток двигателя с эмалевой изоляцией.

Список литературы

1 Опыт студенческих научных разработок макетов приборов для диагностики трансформаторов, асинхронных и бесколлекторных двигателей / Л. В. Шенец, В. М. Овчинников, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. – 2026. – № 8 (346). – С. 22–25.

2 Диагностика коротких замыканий обмоток BLDC-двигателей с использованием частотного анализа / В. Н. Галушко, О. В. Холодилов, И. Л. Громыко, С. А. Можаев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2026. – № 1 (52). – С. 23–26.

3 Частотный анализ обмоток BLDC-двигателей для диагностики коротких замыканий / И. С. Демидович, А. А. Калачев, В. Н. Галушко, А. А. Поддубный // Строительство и восстановление искусственных сооружений : материалы Междунар. науч.-техн. конф., 13–14 мая 2026 г., Гомель. – Гомель : БелГУТ, 2026. – С. 97–99.

4 **Галушко, В. Н.** Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трёхфазных трансформаторов на основе частотных характеристик / В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Приборы и методы измерений. – 2025. – Т. 16, № 2. – С. 158–167.

УДК 551.4(476.13)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА СЕРЫ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ ОТ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

А. В. ДУДАРЕВА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Диоксид серы является одним из основных газообразных загрязнителей, поступающих в атмосферу с дымовыми газами тепловых электростанций, металлургических, химических и цементных производств. Его выбросы связаны с кислотными осадками, образованием мелкодисперсных частиц и негативно влияют на здоровье человека. В настоящее время разработаны разные методы очистки дымовых газов, которые не только очищают промышленные выбросы, но и позволяют получить полезный товарный продукт, что кардинально меняет экономику всего процесса [1, 2].

Самыми распространёнными методами в мире, особенно на угольных тепловых электростанциях, являются мокрые известняковые скрубберы. Дымовые газы пропускают через башню-абсорбер, где они орошаются водной суспензией тонкоизмельченного известняка или извести. Диоксид серы, растворяясь в воде, образует сернистую кислоту, которая вступает в реакцию с карбонатом или гидроксидом кальция, давая в конечном счете кристаллический гипс. Технология позволяет достичь эффективности улавливания диоксида серы до 95–98 % и более, что делает ее абсолютным лидером в энергетике. Однако у данной технологии есть недостатки: избыточное потребление воды, необходимость очистки сточных вод от хлоридов и тяжелых металлов, а также проблема коррозии оборудования из-за кислой среды, что требует использования кислостойких нержавеющих сталей или футеровки [1, 3].

В тех случаях, когда нет возможности получать гипс или есть ограничения по воде, используют полусухие и сухие методы очистки, где поглотитель (обычно гашеная известь или известняк) вводится в газовый поток в виде тонкодисперсной суспензии или порошка. В полусухих скрубберах суспензия распыляется через форсунки в реактор, и диоксид серы абсорбируется каплями воды, которые при этом испаряются. В результате на выходе получается сухой порошок, состоящий из сульфита и сульфата кальция, который затем улавливается электрофильтром или рукавным фильтром. Эффективность таких систем несколько ниже – порядка 80–90 %, но они гораздо компактнее, потребляют меньше воды и не дают жидких стоков, что делает их привлекательными для предприятий, расположенных в засушливых регионах, или для модернизации существующих установок с ограниченным пространством [2, 5].

Аммиачный метод отличается от известнякового тем, что он не создает твердых отходов и производит товарный продукт – сульфат аммония $(NH_4)_2SO_4$, который используется как сложное азотно-серное удобрение в сельском хозяйстве [1, 5]. Этот метод обеспечивает эффективность 95–99 % и особенно выгоден для предприятий, расположенных рядом с производствами аммиака (например, коксохимические заводы или предприятия по производству минеральных удобрений). Данный метод является дорогостоящим из-за стоимости аммиака и специфическим из-за выделения непрореагировавшего аммиака.

Для газов с очень высокой концентрацией диоксида серы, например в металлургии при обжиге сульфидных руд, где содержание диоксида серы может достигать 20–40 %, применяется метод улавливания с получением серной кислоты, что является контактным методом ее производства, встроенным в газоочистку [1, 4]. Технология включает несколько стадий: сначала газ очищается от

пыли и тяжелых металлов, затем его осушают, после чего диоксид серы в присутствии ванадиевого катализатора окисляется до серного ангидрида, который затем абсорбируется серной кислотой с получением олеума или товарной кислоты. Это дорогое и сложное производство, требующее высокой квалификации персонала и тщательного контроля параметров [1].

В качестве альтернативы для средних и малых предприятий могут рассматриваться сухие сорбционные методы с использованием активированного угля, цеолитов или других пористых материалов, которые физически адсорбируют диоксид серы на своей поверхности [5]. Эффективность данного метода может достигать 85–95 % при правильно подобранном сорбенте и температуре. Недостаток данного метода заключается в том, что адсорбция обратима и насыщенный сорбент нужно либо регенерировать (что энергозатратно), либо утилизировать вместе с уловленным диоксидом серы.

В последнее время активно разрабатываются регенеративные методы, например известняковый с получением элементарной серы, где диоксид серы сначала селективно поглощается специальным аминовым раствором, затем десорбируется в виде концентрированного газа, который потом по реакции Клауса превращается в серу – это очень дорогая технология, но она оправдана на крупных предприятиях, где требуется не только очистка, но и получение серы как товарного продукта [1].

Перспективной и инновационной технологией очистки дымовых газов от диоксида серы в промышленности является электронно-лучевая обработка. Дымовые газы облучаются пучком электронов, в результате чего диоксид серы и оксиды азота окисляются до серной и азотной кислот, которые затем нейтрализуются аммиаком с образованием сульфата и нитрата аммония (удобрение), но сам процесс требует мощных ускорителей и большого расхода электроэнергии, что делает его пока малопривлекательным вне экспериментальных установок. Также развиваются биологические методы, где используются специальные штаммы микроорганизмов-сульфатредукторов или тионовых бактерий, которые окисляют диоксид серы до сульфатов в биофильтрах или биореакторах – это экологично, но медленно и требует больших площадей, подходит в основном для газов с низкими концентрациями [5].

На основании комплексного анализа технологий очистки от диоксида серы газовых выбросов в атмосферный воздух от стационарных источников установлено, что мокрая известняковая сероочистка является наиболее распространённой в энергетике, однако характеризуется значительным расходом воды, образованием сточных вод и коррозией оборудования. Полусухие и сухие методы более компактны и не дают жидких стоков, но уступают по эффективности. Аммиачный метод и метод получения серной кислоты позволяют получать товарные продукты (сульфат аммония, серную кислоту), что кардинально меняет экономику процесса. Сорбционные и регенеративные методы эффективны, но энергозатратны либо дорогостоящи, а инновационные разработки пока ограничены экспериментальными условиями или низкими концентрациями диоксида серы.

При выборе технологии очистки газовых выбросов от диоксида серы для каждой конкретной отрасли необходимо учитывать следующие факторы:

1) начальную и требуемую конечную концентрацию диоксида серы;

2) объем газового потока;

3) наличие других загрязнителей (пыль, тяжелые металлы, хлориды, фториды);

4) температуру и влажность газов;

5) наличие водных ресурсов;

6) стоимостью реагентов и возможности реализации побочных продуктов (гипс, сульфат аммония, серная кислота, элементарная сера);

7) действующие экологические нормативы и экономические стимулы, включая экологические налоги и плату за выбросы.

Список литературы

1 **Чемеков, А. А.** Обзор методов очистки отходящих газов от диоксида серы / А. А. Чемеков В. Ю. Никулин, В. В. Клочихин // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – Т. 39. – С. 3036–3040.

2 **Тимонин, А. С.** Инженерно-экологический справочник / А. С. Тимонин. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. – 915 с.

3 **Картавская, В. М.** Основы промышленной экологии. Оценка ущерба от выбросов загрязняющих веществ в атмосферу : учеб. пособие / В. М. Картавская, Т. В. Коваль. – Иркутск : ИрГТУ, 2007. – 195 с.

4 **Разва, А. С.** Методы и технологии очистки дымовых газов от оксидов серы / А. С. Разва // Студопедия. – 2010. – URL: http://studopedia.ru/5_16593_metodi-ochistki-dimovih-gazov-ot-oksidov-seri.html (дата обращения: 11.09.2026).

5 **Медведев, В. В.** Технологии очистки отходящих газов от диоксида серы : учеб. пособие / В. В. Медведев. – М. : Экопресс, 2019. – 245 с.

УДК 624.19/.8:621.763

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ГЕОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИОЛЕФИНОВ

К. В. ЕФИМЧИК, Е. Ф. КУДИНА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В настоящее время требования к эксплуатационным характеристикам полимерных материалов и изделий, получаемых на их основе, постоянно возрастают. Обеспечить эти характеристики можно при оптимальном грамотном выборе связующих материалов, наполнителей и модификаторов в совокупности с совершенствованием применяемых технологических процессов производства. Путем добавления новых компонентов можно изменить свойства традиционных материалов, что в результате приводит к созданию инновационных полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Модифицированные ПКМ являются одними из самых востребованных материалов во многих отраслях промышленности, таких как машиностроение, судостроение, строительство, пищевая промышленность, а также в медицине, биотехнологиях и биоинженерии. С каждым годом сферы их применения расширяются, а объемы производства увеличиваются.

Важнейшими задачами в получении новых композиционных материалов являются подбор добавок и наполнителей, влияющих на совместимость полиолефинов с различными компонентами в композиционной системе, уменьшение себестоимости готового изделия, а также нанесение минимального вреда экологии в процессе его жизненного цикла и последующего процесса рециклинга.

В связи с увеличением объема производства полимеров и ПКМ немаловажное внимание уделяется решению проблем, связанных с экологической безопасностью в ходе жизненного цикла полимерных материалов.

Анализ научно-технической литературы показал, что наиболее изученными дисперсными наполнителями являются мел, сажа, каолин, тальк, базальт и диоксид кремния [1]. В то же время в научно-технической литературе предлагаются к использованию такие дисперсные наполнители, как базальт, шунгит, бентонит, ценосферы и т. д., применение которых в качестве наполнителя полипропилена не до конца изучено.

Настоящая работа посвящена изучению влияния содержания шунгита на механические свойства малонаполненых ПКМ на основе полипропиленовой матрицы.

Интерес применения шунгита в качестве наполнителя для ПКМ вызван особенностями его химического строения и структуры, природным происхождением, экологической безопасностью, а также невысокой стоимостью. Неотъемлемым достоинством шунгита является и то, что данный наполнитель полностью состоит из биполярных высокодисперсных частиц. Такое свойство минерала позволяет применять его в качестве активного наполнителя термопластов [2].

Цель работы – разработка новых ПКМ на основе полипропиленовой матрицы и диспергированного шунгита, исследование механических свойств разработанного материала. В качестве полимерного связующего использовали гранулы полипропилен марки PP 8300G (далее – ПП).

Перед совмещением гранул ПП с шунгитом необходимо провести ряд подготовительных мероприятий. С целью стабилизации структуры и удаления влаги диспергированного шунгита проведена его термическая обработка. Термическая обработка проводилась в лабораторном сушильном шкафу СНОЛ-3,5 при температуре 300 °С в течении 60 мин.

Перед применением в качестве наполнителя шунгит измельчали на шаровой мельнице в течении 2 часов при 60 об./мин. После помола для удаления неразмолотых частиц и отделения из смеси фракции менее 40 мкм шунгит просеивали через набор сит.

Композиции получали путем смешивания компонентов в расплаве на лабораторном одношнековом смесителе. Взвешивание компонентов производили на лабораторных весах M-ER 122 ACFJR. Температура смешения составляла 180 °С, скорость вращения ротора – 70 об./мин, время смешивания – 20 мин. Массовое содержание шунгита в композициях варьировали от 0,5 до 10 мас. %. В ходе проведения исследования было установлено, что при содержании шунгита более 10 мас. % происходит агломерация частиц наполнителя.

Для нахождения оптимальной концентрации наполнителя, обеспечивающего наилучшее сочетание не только механических свойств получаемых образцов, но и параметров их изготовления и пе-

реработки, был получен и исследован ряд наполненных образцов на базе ПП с разной концентрацией наполнителя.

Испытание полученных образцов на сжатие проводилось в соответствии с ГОСТ 4651-2014 в лаборатории «Электрические и электронные системы» УО «Белорусский государственный университет транспорта» (БелГУТ) на универсальной разрывной машине ТС244.31А. Результаты испытаний на сжатие представлены на рисунке 1.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что введение диспергированного шунгита в количестве от 0,5 до 4 мас. % нецелесообразно, т. к. прочность композиции уменьшается. При введении шунгита в количестве от 5 до 7 мас. % прочность композиции увеличивается практически на 23 %. Введение наполнителя от 8 до 10 мас. % практически не влияет на прочность исходного материала, поэтому повышение концентрации наполнителя более 7 мас. % нецелесообразно.

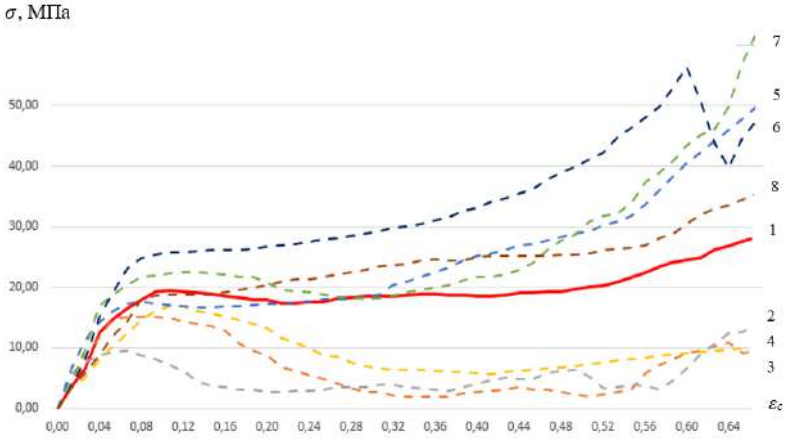


Рисунок 1 – Зависимость напряжения σ, мм, от относительной деформации ε_c с содержанием шунгита в композиции: 1 – 0 мас. %; 2 – 0,5 мас. %; 3 – 1 мас. %; 4 – 2 мас. %; 5 – 3 мас. %; 6 – 5 мас. %; 7 – 7 мас. %; 8 – 10 мас. %

Испытание образцов на твердость проводилось в соответствии с ГОСТ 24261-2015 на кафедре «Водоснабжение, химия и экология» БелГУТа на твердомере (дюрометре) по Шору типа ТВР-DM. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 – **Влияние наполнителя на твердость композита**

Концентрация шунгита, мас. %	0	4	5	6	7	8	9	10
Твердость по шкале Шора	44	45	46	46,5	47	48	48	48

Оценка полученных результатов позволяет сделать вывод, что при введении шунгита в количестве от 5 до 10 мас. % твердость композиции меняется незначительно.

Для оценки общей долговечности и поведения изготовленных изделий в реальных условиях эксплуатации проводили предварительные натурные и лабораторные испытания. В лабораторных условиях моделировали интенсивное воздействие солнечного света, дождя, образование конденсата и температурные перепады. Это позволило ускорить процессы старения и разрушения, сэкономить время на исследование образцов. Длительность тестирования материала составила 5 суток, что соответствует 15 годам эксплуатации материала на открытом воздухе в климатических условиях Республики Беларусь.

Испытания на абразивный износ проводились в соответствии с ГОСТ 11012-69 «Пластмассы. Методы испытания на абразивный износ» при помощи абразивметра путем измерения потери массы образцов. Для исходного ПП величина потери массы в испытаниях на абразивный износ составляла 15 %. Введение от 5 до 7 мас. % шунгита в качестве наполнителя позволяет снизить потерю массы на 3 %.

Таким образом, введение даже от 5 до 7 мас. % шунгита в полипропиленовую матрицу позволяет повысить устойчивость поверхности ПКМ к истиранию и является целесообразным для повышения эксплуатационных характеристик ПП.

После проведения испытаний разрушенные образцы ПКМ подвергли вторичной переработке. Исследованные образцы вновь загружали в одношнековый смеситель. Температура смешения составляла 180 °С, скорость вращения ротора – 70 об./мин, время смешивания – 15 мин. Далее вновь изготавливали образцы по вышеописанной методике.

При проведении экспериментальной работы особое внимание уделялось планированию эксперимента с соблюдением принципа единства всех условий эксперимента. Как правило, в данном ис-

следовании различиями среди вариантов опыта были виды полимерного связующего и наполнителей, а также их концентрация в полимерной матрице.

Получаемые экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики. В статистике среднее арифметическое – одна из наиболее распространенных мер центральной тенденции, представляющая собой сумму всех наблюдаемых значений, деленную на их количество.

При обработке результатов исследований методами математической статистики использовали стандартную программу MS Excel.

После проведения исследования влияния состава композиции на механические свойства разрушенные образцы с наполнителем из диспергированного шунгита в количестве от 5 до 7 мас. % были подвергнуты вторичной переработке для оценки изменения их свойств в процессе рециклинга.

Сравнительные данные напряжения при сжатии σ при номинальной относительной деформации при сжатии при пределе текучести $\varepsilon_{су}$ образцов с содержанием шунгита в количестве от 5 до 7 мас. % представлены в таблице 2.

Таблица 2 – **Напряжение при сжатии при номинальной относительной деформации**

Концентрация шунгита, мас. %	σ, МПа		$\frac{\sigma_р - \sigma_и}{\sigma_и} \cdot 100$, %
	Исходная композиция, $\sigma_и$	Композиция после рециклинга, $\sigma_р$	
5	25,86	25,61	–0,97
6	23,71	23,27	–1,86
7	22,29	21,87	–1,88

Полученные результаты на сжатие показали, что механические характеристики разрабатываемого материала после повторной переработки ухудшились не более чем на 2 %. Таким образом, шунгит может быть использован для повышения прочности при сжатии композиционных материалов на основе полипропилена, которые могут подвергаться рециклингу без существенной потери прочности.

На основании приведенных данных оптимальный состав ПКМ на основе полипропиленовой матрицы состоит из ПП в количестве от 93 до 95 мас. % и от 5 до 7 мас. % диспергированного шунгита соответственно. При таком составе композиции удается получить ПКМ с повышенной прочностью композиции до 23 %, а также улучшенными характеристиками абразивного износа.

Список литературы

1 **Ефимчик, К. В.** Современные тенденции в области модифицирования полиолефинов дисперсными наполнителями / К. В. Ефимчик, Е. Ф. Кудина // Горная механика и машиностроение. – 2025. – № 2. – С. 89–101.

2 **Ефимчик, К. В.** Влияние шунгита на механические свойства малонаполненного композиционного материала на основе полипропилена / К. В. Ефимчик, Е. Ф. Кудина // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2023. – № 4. – С. 52–60.

УДК 678.8

СТРУКТУРНО-ОРГАНИЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАТРИЦ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Е. Ф. КУДИНА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель
Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель

И. В. ПРИХОДЬКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Н. К. ТУРСУНОВ
Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

Д. С. КАПИТАНОВ
ОАО «ГЗЛиН», г. Гомель, Республика Беларусь

В настоящее время эксплуатация транспортных средств и оборудования сложна или вовсе невозможна без использования покрытий и изоляционных материалов. Это связано с воздействием различных факторов, а иногда целым комплексом факторов (повышенная влажность, агрессивная

химическая среда и, как следствие, коррозия, циклическая смена температур и др.), способных привести к негативным последствиям. Наиболее эффективно с этой задачей справляются композиционные структурно-организованные материалы на основе стабилизированных многокомпонентных органических смесей и низкоразмерных элементосодержащих наполнителей, формирующих при оптимизированных технологических условиях комбинированную матрицу с улучшенными свойствами и интеркалированную низкоразмерной дисперсной фазой определенной природы.

Термопластичные связующие являются наиболее эффективными, поскольку обладают хорошей адгезией к металлическим поверхностям, высокой механической и диэлектрической прочностью, а также выполняют барьерную функцию, защищая металлоизделие от коррозионно-активных водных растворов и кислорода независимо от количества компонентов в составе связующего (рисунок 1).

Использование гибридных функциональных материалов на основе комбинированной эпоксидиановой смолы (ЭС) может стать новым этапом создания композиционных материалов для комплексной защиты металлоизделий.

ЭС как основа комбинированной матрицы, в отличие от других смол, обладают рядом необходимых для нового материала свойств (малая усадка, высокие значения адгезионной прочности, химическая стойкость к действию различных агрессивных сред, атмосферостойкость, высокие физико-механические показатели, хорошая совмещаемость с другими полимерами при отсутствии образования при отверждении летучих веществ. И, что немаловажно, ЭС способна отверждаться в широком интервале температур [1–3]. Несмотря на перечисленные достоинства, одним из существенных недостатков является хрупкость композиционных материалов, получаемых на основе ЭС. Следовательно, применение материала для изоляции высоковольтного электрооборудования железнодорожного подвижного состава и объектов железнодорожной инфраструктуры становится затруднительным, так как разрабатываемый материал должен обладать устойчивостью к воздействию механических нагрузок, возникающих под воздействием вибрации.

Функционализация эпоксидной смолы фенолформальдегидным олигомером [4] позволяет обеспечить эластичные свойства и снизить хрупкость связующего, а также получить композиционные материалы без использования отвердителя. Введение в состав термопластичной матрицы наполнителей различной природы и геометрии позволяет регулировать структуру, свойства материала и увеличить его срок службы, что может снизить ремонтные затраты и замену вышедшего из строя оборудования, создавая адаптированный к определенным условиям эксплуатации материал.

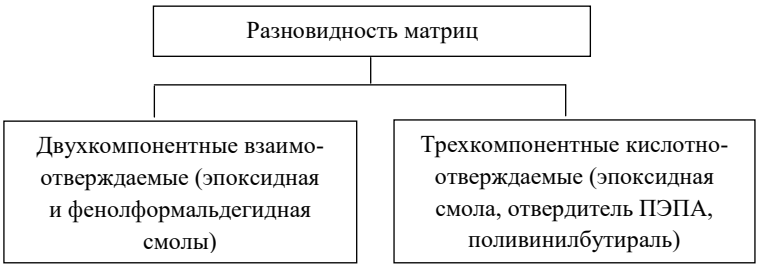


Рисунок 1 – Виды базовых матриц

При разработке покрытий и конструкционных материалов для динамически и климатически нагруженных объектов важно сочетание высокой вибрационной и ударной прочности матрицы с достаточной трещиностойкостью и способностью к релаксации напряжений при интенсивной смене температур. Этого достигают подбором отвердителя и режима отверждения, применением эластичных функциональных модификаторов, армирующих или дисперсных наполнителей [5], а также обеспечением прочной адгезии материала к подготовленной металлической поверхности. Наполнители позволяют уменьшать усадку, повышать модуль, износостойкость и термическую стабильность, однако их избыток или неравномерное распределение способны, напротив, создать концентраторы напряжений. Следовательно, состав композиционного материала должен быть оптими-зирован не только по прочности и химической стойкости, но и по способности выдерживать совместное действие вибрации, температурных перепадов и внешней среды.

Таким образом, вибрационная и термоциклическая устойчивость является одним из наиболее важных критериев долговечности неметаллических покрытий и конструкционных изоляционных материалов.

Подавляющее большинство электрооборудования подвижного состава относится к группе механического исполнения М25, расположенного в кузовах (на кузовах) и под кузовами локомотивов, вагонов пассажирских локомотивной тяги (в том числе промышленного транспорта). В соответствии с этой группой основное вибрационное воздействие на объект осуществляется в диапазоне от

10 до 100 Гц. Однако опасна не столько вибрационная нагрузка, сколько возникающие в отдельных элементах оборудования резонансные явления, которые способны в короткий срок разрушить объект. Введение наполнителей позволяет регулировать резонансные свойства материала. То есть введением наполнителей можно как снизить амплитуду резонанса, так и сместить сам резонанс из зоны основного вибрационного воздействия. Это позволит снизить вибрационную нагрузку и повысить срок эксплуатации оборудования.

Таким образом, правильный выбор основы композиционного материала и функциональных добавок может позволить получить композиционный материал с рядом специализированных свойств для эксплуатации в условиях внешнего комплексного динамического воздействия.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии» подпрограммы «Порошковые и композиционные материалы», задание 4.1.22 «Разработка технологических принципов создания гибридных материалов на основе комбинированных органических матриц с улучшенными эксплуатационными свойствами» (2026–2030 гг.).

Список литературы

1 **Чернин, И. З.** Эпоксидные полимеры и композиции / И. З. Чернин, Ф. М. Смехов, Ю. В. Жердев. – М. : Химия, 1982. – 230 с.

2 **Кудина, Е. Ф.** Защита газо-нефтепроводов от внешних повреждений. Ч. 1. Полимерные материалы (обзор) / Е. Ф. Кудина // Нефтяник полесья. – 2013. – № 2 (24) – С. 88–93.

3 **Kudina, H. F.** Composite Materials Intended to Repair Mechanochemical Defects in Pipelines / H. F. Kudina, S. N. Bukharov, V. P. Sergienko // In: Advances in Engineering Research / Ed. by V. M. Petrova. – New York : Nova Science Publishers, Inc., 2019. – Vol. 26. – Chapter 3. – P. 107–172.

4 Разработка композиционных материалов на основе реактопластов для защиты высоковольтных выпрямительных установок / Е. Ф. Кудина, П. А. Курицын, И. В. Приходько, Г. Р. Гончаров // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2024. – № 2. – С. 41–46.

5 **Золотарева, В. В.** Влияние мелкодисперсных наполнителей на износ эпоксидных и эпоксидно-каучуковых полимеров / В. В. Золотарева, Т. И. Григоренко, Ю. С. Кочергин // Современные строительные материалы. – 2013. – Вып. 1 (99). – С. 108–113.

УДК 629.4.016.2

ОЦЕНКА ЗАТРАТ МОЩНОСТИ НА ПРИВОД ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЕПЛОВОЗОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Р. М. КУНАТ
Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта,
г. Москва, Российская Федерация

Как известно, железнодорожный транспорт входит в число наиболее энергоемких отраслей экономики. По справочным данным [1] в России около 10 % общего расхода топлива страны приходятся на железнодорожный транспорт. В соответствии с Энергетической стратегией ОАО «РЖД» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года [2] необходимо снижать общий расход топлива в масштабах всей сети железных дорог. Необходимо отметить, что из этого общего расхода дизельного топлива порядка 70–80 % приходятся конкретно на локомотивную тягу. Остальная часть дизельного топлива используется на такие вспомогательные нужды, как привод специального самоходного подвижного состава, железнодорожных кранов, строительной техники, служебного автотранспорта, а также применяется в некоторых котельных.

В качестве путей к снижению общего расхода дизельного топлива применительно к локомотивной тяге можно привести два направления. С одной стороны, это техническое усовершенствование самих тепловозов, их силовых установок, тяговых передач, а также вспомогательного оборудования. Как правило, этот путь ограничен как экономическими соображениями, так и текущим уровнем технологий. С другой стороны, значительной экономии дизельного топлива можно достигать через организационные мероприятия, которые направлены на повышение энергетической эффективности тепловозов в эксплуатации. Известен комплексный показатель [3], согласно которому энергетическую эффективность тепловоза можно оценить исходя из значений выполненной полезной работы на тягу поездов и расхода топлива за конкретную поездку.

Источником информации о фактической работе определенного тепловоза может служить бортовая микропроцессорная система управления (МСУ). В общем случае расход топлива определяется как сумма расхода топлива в режимах холостого хода и тяги с учетом затрат мощности на привод вспомогательного оборудования. Автором в работе [4] более подробно изложена методика расчета расхода топлива на конкретные позиции исходя из данных бортовой МСУ тепловозов серии 2ТЭ25КМ. С целью учета различных условий эксплуатации собраны данные о реальных поездках (сменах) тепловозов данной серии разных депо Московской, Октябрьской и Приволжской железных дорог – филиалов ОАО «РЖД». В общей сложности обработаны данные о 600 поездках, то есть по 10 поездок 20 секций тепловозов серии 2ТЭ25КМ каждой из этих трех железных дорог. При этом по приведенной в [4] методике проведен расчет расхода топлива в режимах холостого хода ($В_{ХХ}$) и тяги ($В_{ТЯГ}$); через затраты мощности на привод проведена оценка расхода топлива на основные вспомогательные нагрузки, а именно мотор-вентиляторы охлаждения дизель-генераторной установки ($В_{МВД}$), тяговых электродвигателей передней и задней тележек ($В_{МВТ}$), выпрямительной установки ($В_{МВВУ}$), а также вентилятор отсоса пыли из блока мультициклонов ($В_{МВОП}$); тормозной компрессор ($В_{ТК}$), возбудитель тягового генератора ($В_{ВОЗБ}$) и заряд аккумуляторной батареи ($В_{АБ}$). Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 – **Расход топлива на отдельные позиции тепловозов серии 2ТЭ25КМ**

Железная дорога	Средние значения за 200 смен, кг *(% от общего расхода топлива)*									
	$В_{ХХ}$	$В_{ТЯГ}$	$В_{МВД}$	$В_{МВТ}$	$В_{МВВУ}$	$В_{МВОП}$	$В_{ТК}$	$В_{ВОЗБ}$	$В_{АБ}$	$В_{Σ}$
Московская	76,31 *(13,78)*	499,05 *(64,30)*	65,33 *(8,59)*	24,38 *(3,98)*	14,07 *(2,21)*	13,27 *(2,24)*	13,65 *(2,13)*	12,67 *(1,99)*	4,57 *(0,78)*	723,29 *(100,00)*
Октябрьская	70,27 *(11,57)*	446,70 *(69,23)*	46,73 *(7,29)*	22,44 *(3,64)*	12,75 *(2,06)*	12,49 *(2,04)*	9,79 *(1,57)*	12,05 *(1,94)*	4,13 *(0,68)*	637,34 *(100,00)*
Приволжская	71,82 *(10,45)*	527,65 *(69,26)*	68,80 *(9,05)*	24,08 *(3,39)*	14,04 *(1,96)*	13,02 *(1,85)*	11,28 *(1,58)*	13,04 *(1,81)*	4,58 *(0,65)*	748,31 *(100,00)*
Средние значения за 600 смен, кг *(% от общего расхода топлива)*										
	72,80 *(11,93)*	**491,13 *(67,60)***	**60,29 *(8,31)***	**23,63 *(3,67)***	**13,62 *(2,08)***	**12,93 *(2,04)***	**11,57 *(1,76)***	**12,59 *(1,91)***	**4,43 *(0,70)***	**702,98 *(100,00)***

По паспортным данным [5] принято считать, что затраты мощности на привод вспомогательного оборудования составляют порядка 10–15 % от общей мощности по дизелю. Однако, как видно в таблице 1, данные значения могут существенно различаться в зависимости от конкретных условий эксплуатации, и на практике доля расхода топлива на собственные нужды может достигать около 20 %. На данной основе проведено более подробное исследование затрат мощности на привод вспомогательного оборудования (рисунок 1).

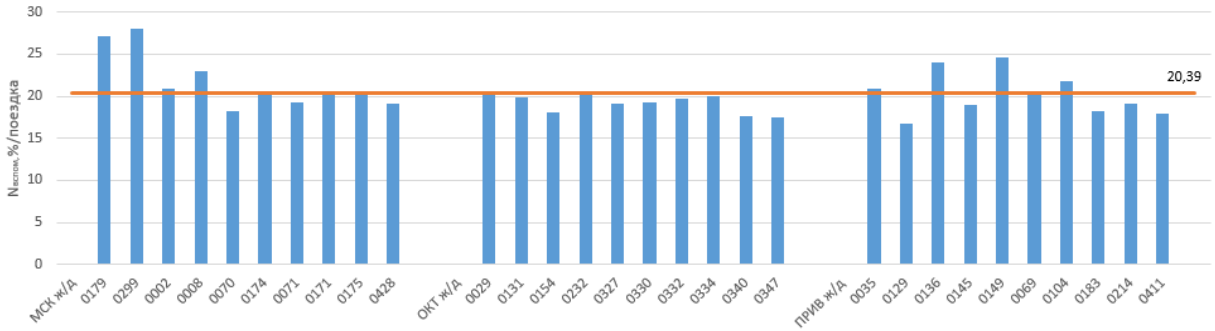


Рисунок 1 – Средние значения доли затрат мощности на привод вспомогательного оборудования от общей мощности по дизелю

При этом столбцы представляют собой средние арифметические значения общих затрат мощности на привод вспомогательного оборудования за 20 поездок (смен работы) – по 10 поездок (смен) у каждой секции тепловоза, а горизонтальная линия – среднее арифметическое значение за все рассмотренные 600 поездок (смен). За все наблюдения наименьшие средние затраты мощности на вспомогательные нужды в размере 16,57 % зафиксированы у секции тепловоза 2ТЭ25КМ 0129А Приволжской железной дороги, а наибольшие затраты в размере 28,72 % наблюдались у секции

тепловоза 2ТЭ25КМ 0299А Московской железной дороги. Среднее арифметическое значение составило 20,39 %, а среднее квадратичное отклонение – 2,77 %.

Существенное влияние на долю затрат мощности на привод вспомогательного оборудования не только применительно к тепловозам серии 2ТЭ25КМ оказывает полезная нагрузка тепловоза. Чем ближе она к расчетному режиму работы, тем меньшая доля мощности уходит на вспомогательные узлы. Частичные нагрузки, длительные стоянки в режиме холостого хода, а также переключения управления привода вспомогательных нагрузок с автоматического на ручной режим, наоборот, могут резко увеличить влияние затрат мощности на привод вспомогательных нагрузок.

Список литературы

1 Энергосбережение на железнодорожном транспорте : справ.-метод. издание / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. И. Иванов ; под ред. В. А. Гапановича [и др.]. – М. : Интехэнерго-Издат, Теплоэнергетик, 2014. – 304 с.

2 Об утверждении Энергетической стратегии холдинга Российские железные дороги» : распоряжение ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2537/р на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 11.09.2026).

3 Критерий оценки эффективности транспортного средства / Е. Е. Коссов, В. В. Асабин, А. Г. Силюта, Л. Е. Коссова // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2019. – Т. 78, № 2. – С. 96–99.

4 **Кунат, Р. М.** Результаты апробации методики расчета расхода топлива по данным бортовых МСУ с учетом влияния мощности на привод вспомогательного оборудования (по материалам Московской, Октябрьской и Приволжской железных дорог) / Р. М. Кунат, А. Г. Силюта // Транспортное дело России. – 2025. – № 7. – С. 194–198. – EDN VVJCFR.

5 Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ. Руководство по эксплуатации. Часть 1. Техническое описание 2ТЭ25КМ РЭ. – ЗАО УК БМЗ, 2015. – 418 с.

УДК 656.13,073(476)

ЗЕЛЕНАЯ ЛОГИСТИКА: СНИЖЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ПРИ ГРУЗОПЕРЕВОЗКАХ

Д. И. ЛИКСИНА, Д. С. ЛИБЕРТОВИЧ
Белорусский государственный экономический университет, г. Минск

Транспортный сектор остается одним из основных источников парниковых газов. В условиях выполнения международных обязательств снижение углеродного следа при грузоперевозках становится приоритетом для многих стран, включая Республику Беларусь. Концепция зеленой логистики включает оптимизацию маршрутов, обновление автомобильного парка, переработку отходов и цифровизацию процессов, а также внедрение экологически безопасных мер, направленных на энергосбережение, сокращение выбросов углекислого газа и минимизацию отходов во всей логистической цепи. В то же время, как показывают исследования, значительный вклад в сокращение выбросов вносит не только выбор транспорта, но и способ его эксплуатации.

Электрификация грузового транспорта в Беларуси сдерживается не только высокой стоимостью техники, но и недостаточной зарядной инфраструктурой для тяжелых магистральных тягачей. Агрессивный стиль управления транспортным средством влечет за собой необоснованный перерасход горючего, преждевременный износ механизмов автомобиля. В этих условиях экодрайвинг может стать быстрым и экономически эффективным решением, поскольку включает в себя совокупность поведенческих практик водителя. Внедрение экодрайвинга позволяет сократить выбросы углекислого газа. Это влияет на снижение парникового эффекта [10]. Метаанализ показывает, что обратная связь по стилю вождения снижает расход топлива на 5,5 % в зависимости от типа транспортного средства и условий его эксплуатации [9]. При этом в Республике Беларусь потенциал экодрайвинга реализуется недостаточно, а существующие научные работы фокусируются в основном на электротранспорте, оставляя поведенческий фактор вне системного анализа [2].

Отметим, что в Беларуси законодательство в зеленой логистике касается обновления парка и внедрения альтернативного топлива. Системы спутникового мониторинга GPS и ГЛОНАСС редко используются для предоставления водителю обратной связи о манере вождения. Как следствие, потенциальная экономия топлива остается нереализованной. Существующие рекомендации по экодрайвингу носят общий характер и не учитывают загрузку транспорта и специфику белорусских дорог. В то же время зарубежные исследования подтверждают, что даже незначительные изменения в поведении водителя, адаптированные к дорожным условиям, дают значительный эффект [2].

Исходя из проведенного анализа следует выделить концепцию адаптивного экодрайвинга, которая, в отличие от стандартных подходов, учитывает и региональные факторы. Для равнинной Беларуси наиболее значимы не столько крутые спуски и подъемы, сколько правильное использование наката и отсечки топлива на длинных прямых участках. Современные исследования показывают, что учет предстоящего рельефа позволяет водителям более эффективно управлять скоростью [5]. Также при логистических транспортировках следует учитывать, что тяжелый груз требует иного режима разгона и торможения. Внедрение весовых датчиков в систему мониторинга позволит корректировать рекомендации в реальном времени.

Также для оптимизации предложенных процессов предлагается надстройка над уже установленными терминалами спутникового мониторинга. Она будет формировать индивидуальный «экобалл» водителя и давать подсказки на основе алгоритмов. Это не требует закупки нового оборудования, что критически важно для белорусских логистических компаний с ограниченным бюджетом. Как показывает мировая практика, даже базовые системы визуальной обратной связи могут обеспечить экономию топлива [8].

Реализация концепции «экодрайвинга» строится на трех уровнях. Первый – это визуальная обратная связь, включающая индикатор текущего расхода и оценку разгона или торможения, что уже дает экономию топлива. Далее идет использование цифровых карт местности и данных о погоде для управления скоростью с применением алгоритмов смешанного целочисленного модельно-прогнозирующего управления, зарекомендовавших себя в зарубежных исследованиях [6]. Последним является включение в модель текущей массы груза и сезонных коэффициентов сцепления.

По данным белорусских операторов, средний годовой пробег тягача составляет около 130 000 км при расходе 30 л/100 км [3, 4]. При внедрении адаптивного экодрайвинга даже консервативная оценка в 10 % экономии дает сокращение расхода на 3900 л в год на один автомобиль. Для парка в 100 единиц это 390 000 л дизельного топлива или около 1045 тонн углекислого газа ежегодно. При этом затраты на программную надстройку и обучение водителей окупаются в течение первого года эксплуатации [10]. В перспективе с учетом роста числа грузовых автомобилей и ужесточения экологических норм эффект от внедрения адаптивного экодрайвинга будет только увеличиваться.

Существуют особенности внедрения концепции в Республике Беларусь. Для успешной реализации предлагаемого подхода необходимо дополнить нормативную базу положениями о стимулировании экологичного вождения, что подтверждается исследованиями эффективности механизмов стимулирования [7]; создать базу цифровых карт с актуальной информацией о дорожном рельефе и состоянии покрытия (совместно с ОАО «Белавтодор»); разработать краткие обучающие уроки для водителей с акцентом на местную специфику дорожного покрытия: гололед, длинные прямые участки, особенности городского движения в Минске и областных центрах; запустить пилотный проект на базе одного из крупных логистических операторов (например, РУП «Белтаможсервис»).

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что экодрайвинг является недооцененным, но эффективным инструментом зеленой логистики для грузовых перевозок. Ключевая задача − формирование у водителей устойчивых навыков безопасного и экономичного управления транспортным средством. В основе решения лежит постоянный процесс совершенствования: система проводит непрерывный анализ стиля вождения, предоставляет персонализированные рекомендации, и это позволяет водителю корректировать свои действия и повышать эффективность управления в режиме реального времени, а также снизить выбросы углекислого газа без масштабных инвестиций. Данный подход может стать важной частью национальной стратегии декарбонизации транспорта до 2030 года.

Список литературы

1 **Журун, Я. А.** Зелёная логистика и искусственный интеллект: оптимизация складских процессов / Я. А. Журун, К. А. Кнышевич // Развитие логистики и управление цепями поставок : материалы V Междунар. науч.-практ. молодежной конф., посвящ. 55-летию кафедры «Экономика и логистика» (в рамках Междунар. молодёжного форума «Креатив и инновации'2024»), Минск, 5 дек. 2024 г. – Минск : БНТУ, 2024. – С. 77–84.

2 **Мигно, А. С.** Зеленая логистика в Республике Беларусь: направления и приоритеты развития / А. С. Мигно, В. И. Кобец // Инновации: от теории к практике : сб. тез. докл. X Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 30–31 окт. 2025 г. / Брест. гос. техн. ун-т. – Брест, 2025. – С. 276–277.

3 Расход топлива на тягаче // Автострада-Трейд. – URL: https://avtostrada-trade.ru/o-kompanii/blog (дата обращения: 08.09.2026).

4 РД 37.009.015-98. Методическое руководство по определению стоимости автомототранспортных средств с учетом естественного износа и технического состояния на момент предъявления. – 8-е изд., перераб. и доп. // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 08.09.2026).

5 An IOHMM-based look-ahead driver model considering upcoming road grade // ScienceDirect. – URL: https://www. sciencedirect.com (date of access: 08.09.2026).

6 Eco-Coasting Controller Using Road Grade Preview: Evaluation and Online Implementation Based on Mixed Integer Model Predictive Control // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2023. – Vol. 72, is. 10. – P. 12508–12523.

7 Eco-Driving Incentive Mechanisms for Mitigating Emissions in Urban Transportation // IEEE Xplore. – URL: https:// ieeexplore.ieee.org (date of access: 08.09.2026).

8 National Center for Sustainable Transportation. A Meta-Analysis of Eco-Driving Feedback Research. – URL: https://ncst.ucdavis.edu/project (date of access: 08.09.2026).

9 Reducing fuel consumption and carbon emissions through eco-drive training // ScienceDirect. – URL: https:// www.sciencedirect.com (date of access: 08.09.2026).

10 Evaluation of Transit Ecodriving in Rural, Suburban, and Urban Environments / X. Xu, H. Li, H. Liu [et al.] // TRID. – 2018. – 15 p.

УДК 658.26

ВОПРОСЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ КОТЕЛЬНО-ПЕЧНОГО ТОПЛИВА В ОРГАНИЗАЦИЯХ МИНТРАНСА

С. В. ЛЯХОВ, И. П. ГОНЧАРОВ
Белорусский научно-исследовательский институт транспорта (БЕЛНИИТ «ТРАНСТЕХНИКА»), г. Минск

В Республике Беларусь особое внимание уделяется энергетической безопасности страны, одним из элементов которой является потребление местных топливно-энергетических ресурсов (далее – местных ТЭР). Поскольку организациями Минтранса потребляется значительное количество котельно-печного топлива (далее – КПТ), большая часть из которого составляет углеводородное топливо, то увеличение или сохранение уровня потребления местных ТЭР является значимой задачей, а подтверждение достижения целей Государственной программы «Устойчивая энергетика и энергоэффективность» на 2026–2030 годы обеспечивается сведениями о целевом показателе по доле местных ТЭР в КПТ.

В организациях отрасли наблюдается тенденция ежегодного снижения показателя по доле местных ТЭР в КПТ. Задачей работы было провести анализ потребления местных ТЭР и КПТ, а также выявить главные факторы снижения показателя.

В 2025 году организациями Минтранса было потреблено около 12,8 тыс. т у.т. местных ТЭР при объеме потребления КПТ 95,1 тыс. т у.т. Виды и объемы потребления местных ТЭР в порядке убывания приведены в таблице 1.

Таблица 1 – **Виды и объем потребления местных ТЭР организациями Минтранса в 2025 году**

Вид местных ТЭР	Объем потребления, тыс. т у.т.	Доля потребления, %
Дрова	6,85	53,4
Отходы сельскохозяйственной деятельности	1,98	15,4
Брикеты и полубрикеты торфяные	1,44	11,2
Отходы лесозаготовок и деревообработки	1,23	9,6
Энергия воды и солнца	0,88	6,9
Древесные брикеты	0,25	1,9
Топливная щепа	0,10	0,8
Древесные гранулы, пеллеты	0,10	0,8

В топливном балансе Минтранса потребление КПТ и местных ТЭР распределяется неравномерно и зависит от специфики производственно-хозяйственной деятельности организаций. В выполнении показателя по доле местных ТЭР в КПТ Минтранса (таблица 2) определяющее значение имеет доля потребления местных ТЭР БЖД – 74,1 % с долей потребления КПТ 51,0 %. Значительный вклад в потребление местных ТЭР в носят организации дорожного хозяйства с долей 13,9 % при доле КПТ 5,6 % и организации водного транспорта с долей 6,4 % при доле КПТ 0,4 %. Вместе с тем у ОАО «ДОРОРС» доля потребления местных ТЭР 2,0 % при доле КПТ 37,6 %.

Таблица 2 – **Доля потребления местных ТЭР и КПТ, показатели по доле местных ТЭР в КПТ**

Подотрасль	Доля потребления КПТ, %	Доля потребления местных ТЭР, %	Показатель по доле местных ТЭР в КПТ, %			
	2025 г.		2022 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.
Минтранс	100,0	100,0	15,0	14,8	13,7	13,5
БЖД с ОАО	51,0	74,1	21,4	21,1	19,3	19,6
ОАО «ДОРОРС»	37,6	2,0	0,9	1,1	0,8	0,7
Организации дорожного хозяйства	5,6	13,9	40,6	37,5	34,0	31,9
Департамент по авиации	4,5	1,4	10,8	11,1	9,1	4,2
Автомобильный транспорт	Суммарно 1,3	0,6	59,6	62,4	21,9	24,6
Водный транспорт		6,4	100,0	100,0	100,0	100,0
Промышленные организации		1,4	100,0	100,0	100,0	100,0
Прочие организации		0,2	36,3	27,6	17,2	23,5

На основании проведенного анализа выявлено, что объективными факторами снижения показателя по доле местных ТЭР в КПТ Минтранса в целом являются:

1 Системное выполнение работ по выводу котельного оборудования, работающего на местных ТЭР, с коэффициентом полезного действия менее 75 % в рамках выполнения пункта 91 Плана мероприятий по реализации Директивы Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. № 3.

2 Замена в организациях котлов и печей, работающих на местных ТЭР, на электрокотлы и электроконвекторы. Организации Минтранса в рамках реализации мероприятий Комплексного плана развития электроэнергетической сферы до 2025 года с учетом ввода Белорусской атомной электростанции, утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 01.03.2016 № 169, продолжают замещение традиционных теплоисточников, работающих на местных ТЭР.

В связи с передачей управления движением поездов в Центр управления перевозками (ЦУП) с использованием на линейных станциях «безлюдных» технологий дистанционного управления, увеличивается применение электрического обогрева с автоматическим управлением взамен котлов на местных ТЭР (в помещениях поддерживается минимальная температура 5 °С);

3 Климатические изменения. Местные ТЭР в основном используются в организациях для собственных нужд (отопление помещений и горячее водоснабжение), при этом котельные имеют децентрализованное размещение и малую мощность выработки до 0,1 Гкал/ч тепловой энергии. Увеличение средней температуры воздуха и уменьшение отопительного периода на 2–3 недели в 2025 году привело к снижению потребления местных ТЭР на 370 т у.т. по сравнению с 2024 годом.

4 Снижение выработки электрической энергии от мини-ГЭС, расположенных на Днепровско-Бугском канале. В 2025 году произведено 2988 тыс. кВт·ч электрической энергии, что эквивалентно 368 т у.т., а в 2024 году произведено 4095 тыс. кВт·ч, что эквивалентно 504 т у.т. Снижение составило 135 т у.т. или на 26,7 %. Причиной снижения производства электрической энергии является снижение уровня воды в канале из-за климатических изменений.

5 Рост потребления КПТ на производственные нужды. В организациях Минтранса 93,0 % КПТ расходуется на производственные нужды. Для эффективности технологических процессов с учетом технической и экономической целесообразности в большинстве случаев используется природный газ, его доля в общем потреблении КПТ составляет 73,0 %.

Организациями дорожного хозяйства в 2025 году отремонтировано на 13,5 % больше дорог, чем в 2024 году. Рост объемов ремонта дорог привел к увеличению производства асфальтобетонной смеси, которое осуществляется с использованием природного газа, топочного мазута и печного бытового топлива, и технологически невозможно применение местных ТЭР. Увеличение производства асфальтобетонной смеси в 2025 году составило 45 439 тонн или на 22,6 % больше, чем в 2024 году. В результате за 2025 год организации дорожного хозяйства потребили КПТ больше на 506 т у.т.

С вводом в эксплуатацию в ОАО «Минский завод гражданской авиации № 407» комплекса по смывке и покраске наружной поверхности воздушных судов и их техническому обслуживанию в 2025 году на заводе провели на 38 % больше технических обслуживаний и покрасили на 66,7 % больше воздушных судов, чем в 2024 году. В результате на заводе в 2025 году выросло потребление КПТ на 446 т у.т. по сравнению с 2024 годом.

Можно заключить, что обозначенная тенденция по снижению показателя по доле местных ТЭР в КПТ будет сохраняться и в 2026–2030 годы, что в основном связано с постоянным ежегодным ростом потребления КПТ на производственные нужды при сокращении потребления местных ТЭР, используемых главным образом для обогрева помещений в отопительный период и замещаемых отоплением на электрической энергии.

Дисбаланс по объемам потребления местных ТЭР и КПТ по подотраслям оказывает существенное влияние на выполнение показателя по доле местных ТЭР в КПТ в целом по Минтрансу. Например, динамика изменения потребления местных ТЭР по Минтрансу зависит на 91 % от динамики изменения потребления местных ТЭР Белорусской железной дорогой.

Увеличение потребления местных ТЭР возможно через капитальные вложения в новые энергоэффективные технологии. Потенциалом роста потребления местных ТЭР организациями на 2026–2030 годы является внедрение тепловых насосов, гелионагревательных установок, фотоэлектрических комплексов.

УДК 534.286.2

МЕТОД КОНТРОЛЯ ТЕСТОВЫХ ШУМОВ ДЛЯ ПЕРСОНИФИЦИРОВАННОГО ПОДБОРА СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ СЛУХА РАБОТНИКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

В. В. МАКЕЕВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Т. М. РЫБИНА
Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск

И. П. СЕМЁНОВ
Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск

П. В. МАКЕЕВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Шум является одним из факторов, определяющим вредные условия труда на рабочих местах железнодорожного транспорта. Снижение его воздействия для обеспечения трудового долголетия и предотвращения профессиональных заболеваний работника может быть выполнено с применением средств индивидуальной защиты органов слуха (далее – СИЗОС). Целесообразность применения СИЗОС определяется, прежде всего, уровнями звукового давления, действующими на орган слуха работника, и условиями их ношения и подбора. Согласно статистическим данным (ознакомиться можно по ссылке http://dataportal.belstat.gov.by/ Indicators/Preview?key=208386), количество работников, подвергающихся воздействию звукового давления, составляет в 2025 году около 5 % от численности трудовых ресурсов в Республике Беларусь и существенно не изменяется с 2018 года. Проблема защиты от шума для работников железнодорожного транспорта является наиболее значимой [1–3]. Анализ факторов производственного процесса, выполненный авторами на рабочих местах Белорусской железной дороги по состоянию на 2021 год для отдельных профессий железнодорожного транспорта показал, что 75 % машинистов тепловозов (электровозов), 83 % помощников машиниста тепловоза (электровоза), 64 % монтеров пути подвергаются воздействию повышенного уровня шума (свыше 80 дБА).

Несмотря на существование развернутых законодательных актов, регулирующих применение СИЗОС, многочисленными исследованиями [4, 5, 8–11] показано, что эффективность применения СИЗОС (в т. ч. вкладышей) может быть снижена. Основными причинами являются следующие.

1 Недостаточный уровень обучения работника приемам установки вкладышей в ушной канал и формирования мотивации на их ношение.

2 Необходимость речевой коммуникации между работниками в процессе выполнения трудовых операций.

3 Неправильный подбор вкладышей (особенно вкладышей с оголовьем) при ношении совместно с другими средствами индивидуальной защиты (далее – СИЗ) (очки, наушники, защитные щетки).

4 Отсутствие практики применения методов индивидуального подбора вкладышей для учёта различия размеров и формы левого и правого слухового канала и формы, размеров, материала и

конструкции самих вкладышей. В результате вкладыши при эксплуатации не подавляют шум до уровня, заявленного производителем и подтвержденного в лабораторных условиях. Их многочасовое ношение приводит к дискомфорту: болевые ощущения при плотном прилегании [8] или, наоборот, выпадение из уха, что вынуждает работника прерывать технологический процесс для их повторной установки, способствует внесению загрязнений в слуховой канал (опилки, производственная пыль, сажа), вызывает у работника представление о «бесполезности» применения вкладышей.

Методы индивидуального подбора СИЗОС (в т. ч. вкладышей) не отражены в законодательных актах и носят ограниченное применение на практике. При ненадлежащей эксплуатации СИЗОС в полной мере не оправдывают конечной цели их применения – защита организма работника от вредных и опасных факторов условий труда на рабочем месте.

Развитию и адаптации методов индивидуального подбора СИЗОС для применения на рабочих местах железнодорожного транспорта посвящена настоящая работа.

Цель работы – повышение эффективности применения СИЗОС за счет совершенствования методов персонифицированного их подбора на примере отдельных профессий работников железнодорожного транспорта.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1 Выполнить измерения уровня шума на рабочих местах помощников машиниста на различных типах подвижного состава.

2 Провести сравнительный анализ различных методов персонифицированного подбора средств индивидуальной защиты органов слуха.

3 Разработать метод контроля тестовых шумов при подборе средств индивидуальной защиты органов слуха в условиях производственных предприятий железнодорожного транспорта.

Примером рабочего места на железнодорожном транспорте с высоким уровнем шума является рабочее место помощника машиниста тепловоза и дизель-поезда при выполнении работ в дизельном помещении. Результаты измерений уровней звука и звукового давления в дизельном помещении различных типов подвижного состава показали значительные превышения гигиенического норматива до 33 дБ.

Суммарная экспозиция шума, воздействующего на работника поездной бригады, рассчитывалась по карте фотографии рабочего времени для соответствующего рабочего места и определялась рабочими инструкциями. В работе произведен анализ 20 карт фотографий, отражающих хронометраж на рабочих местах помощника машиниста локомотивных депо Витебск, Жлобин, Калинковичи, Лида, Осиповичи. Экспозиция шума при проведении работ в дизельных помещениях подвижного состава оказывает значительное влияние на эквивалентный уровень звука по шкале А за рабочую смену (таблица 1).

Таблица 1 – **Значения эквивалентного уровня звука за время измерений по типам подвижного состава**

Тип подвижного состава	Эквивалентный уровень звука за время измерений, дБА	Эквивалентный уровень звука за смену, дБА	Время нахождения в дизельном помещении за смену, мин	Предельно допустимый уровень, дБА
Тепловоз 2Т10	95,4	85,5	35	80
Дизель-поезд ДР1А	113,4	103,5	33	
Тепловоз 2М62	112,2	100,8	35	
Тепловоз ТЭП70	97,8	86,34	39	
Тепловоз ТЭП70БС	96,5	85,7	36	

Приведенные значительные уровни звука и звукового давления показывают необходимость применения СИЗОС при выполнении работ в дизельном помещении подвижного состава.

В настоящее время существуют следующие методы индивидуального подбора СИЗОС.

1 Инструментальный метод измерения уровня шума микрофоном на основе стандарта ISO 11904-1:2002. В России этот стандарт принят в качестве государственного – ГОСТ Р ИСО 11904-1-2017 «Акустика. Определение излучения близко расположенных к уху источников звука. Часть 1. Метод с использованием микрофона внутри уха». Метод основан на применении микрофона, установленного в слуховой проход: microphone-in-real-ear technique (MIRE). Техника MIRE применяется исследователями для оценки эффективности противошумных наушников с применением, например, двухканального шумомера SV-102 с микрофонами SV-25S и SV-25D производства фирмы «Svantek» (Польша).

2 Программно-инструментальный комплекс на основе стандарта ANSI/ASA S12.71-2018 Performance criteria for systems that estimate the attenuation of passive hearing protectors for individual users (ANSI/ASA S12.71-2018 Критерии эффективности для систем, которые оценивают ослабление пассивных средств

защиты слуха для отдельных пользователей). Примеры комплексов: EARfit Dual-Ear Validation System от компании 3M™ (далее – EARfit), SonoPass™ от компании Sonomax, адаптированная авторами [4].

Недостатком подобных комплексов является возможность их реализации только с вкладышами определённого производителя или для специальноизготовленных систем измерения [7]. Так, EARfit применим для вкладышей производства компании 3M™, систему SonoPass™ возможно применить с индивидуально разрабатываемыми вкладышами от компании Sonomax либо введением измерительной трубки волновода с известными и количественно оцененными акустическими свойствами [4]. Описанные системы, реализующие технику MIRE, в настоящее время недоступны для покупки, а серийное производство их аналогов на территории ЕАЭС отсутствует.

3 Метод реального затухания звука на пороге слышимости (Real Ear Attenuation at Threshold (REAT)). Он лежит в основе стандартов ANSI S3.19, ANSI S12.6, ISO 4869-1, AS/NZS 1270, а также ГОСТ ISO 4869-1. В основе техники REAT лежит субъективный подход, при котором испытуемый проходит проверку слуха с установленным СИЗОС и без него и может быть использован при персонифицированном подборе СИЗОС.

Методические рекомендации National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), также реализующие технику REAT, являются простым и эффективным решением вопроса персонифицированного выбора вкладышей, который не требует покупки специального шумоизмерительного оборудования, безэховых камер и может быть широко реализован предприятиями.

Согласно рекомендациям NIOSH (посмотреть можно по ссылке https://www.cdc.gov/niosh/mining/content/quickfitweb.html) проверку персонифицированной эффективности применения вкладышей возможно проводить по следующей методике:

1 Установить источник звука в тихой комнате.

2 Прослушать звук трека 1 без применения вкладышей.

3 Установить вкладыши и включить трек 2.

4 Если трек 2 возможно услышать, то следует переустановить вкладыши или подобрать иные. Трек 1 и трек 2 определяются как тестовые шумы.

Недостатками предложенных рекомендаций являются следующие: источники звука, применяемые при воспроизведении тестовых шумов, могут вносить корректировку в доминирующий частотный диапазон. Кроме того, методика не предусматривает проверки фонового шума, который может значительно влиять на воспринимаемый звук.

Адаптация техники REAT для широкого применения на предприятиях железнодорожного транспорта предложена в настоящей работе.

Для реализации акустического контроля и повышения эффективности процедуры подбора вкладышей в рекомендации NIOSH требуется внесение следующих корректировок:

1 Колебание уровня фонового шума контролируется шумомером-анализатором спектра непосредственно перед реализацией методики для каждого работника и отражается в протоколе. Колебание уровня фонового шума в режиме Slow не должно превышать 3 дБ за время измерений в одну минуту.

2 Тестовые шумы, треки 1 и 2, перед их прослушиванием работниками контролируются шумомером-анализатором спектра с измерением уровня звука в третьоктавных полосах частот от 31,5 Гц до 20 кГц и фиксацией доминирующего диапазона частот. Время измерений каждого трека одна минута. В случае если доминирующий диапазон частот не совпадает с опорным диапазоном 1000, 1250, 1600 Гц, необходимо заменить звуковоспроизводящее оборудование или произвести корректировку его работы с последующим акустическим контролем.

Доминирующий диапазон является опорным в случае обеспечения разницы между диапазоном 800 и 1000 Гц, а также 1600 и 2000 Гц более 8 дБ в каждом случае, а значения уровня звука в диапазонах 1000, 1250, 1600 Гц не должны отличаться более чем на 3 дБ между собой.

Предложенные особенности положены в основу разработанной методики, прошедшей метрологическую аттестацию в государственной службе метрологии Республики Беларусь АМИ. ГМ 0304 – 2024.

Важным является процесс организации индивидуального подбора вкладышей работнику. Его эффективная реализация позволит снизить риск развития профессиональных заболеваний и обеспечит трудовое долголетие работников железнодорожного транспорта. Основными особенностями индивидуального подбора вкладышей являются:

1 Контроль тестовых шумов, который производится в сфере законодательной метрологии аккредитованной лабораторией, обладающей опытом работы по контролю шума на рабочих местах. Это позволит сторонней независимой организации осуществить подбор вкладышей в интересах работника и его работодателя.

2 Обучение работников методам установки вкладышей в ушной канал.

3 Вывод об эффективном подборе вкладышей производится после проведения анкетирования работника после не менее 40 часов подконтрольного ношения выбранного типоразмера вкладышей с обязательным отражением уровня комфорта, эффективности обучения, удобства выполнения технологических операций в подобранных вкладышах, появления аллергических реакций. При отрицательных результатах анкетирования процедура подбора должна быть повторена.

4 Обеспечение заинтересованности работодателя в индивидуальном подборе вкладышей может быть реализована на основе создания механизма снижения социальных страховых выплат работодателем при реализации процедуры индивидуального подбора вкладышей.

Предложенный подход обеспечит работодателя законодательной возможностью индивидуального выбора типа вкладышей и обеспечит его финансовую заинтересованность при обеспечении работника эффективными СИЗОС.

Представленный в работе подход по персонифицированному выбору СИЗОС, включающий результаты контроля шума на рабочих местах работников локомотивных бригад, организационные рекомендации по выбору СИЗОС, а также метрологически аттестованную методику контроля тестовых шумов, учитывающую фоновый шум и его доминирующий частотный диапазон, может способствовать снижению риска профессиональных заболеваний органов слуха и вовлечения работодателя в создание безопасных условий на рабочих местах.

Список литературы

1 Динамика производственного риска и показатели профессиональной заболеваемости работников железнодорожного транспорта / М. Ф. Вильк, Ю. Н. Каськов, В. А. Капцов, В. Б. Панкова // Медицина труда и экология человека. – 2020. – № 1. – С. 49–59.

2 **Соколов, Д. А.** Обеспечение безопасных условий труда при воздействии на работников поездных бригад виброакустических факторов / Д. А. Соколов, Е. И. Головина // Безопасность техногенных и природных систем. – 2024. – № 8 (1). – С. 50–57.

3 Регулирование профессионально-ассоциированных производственных воздействий на работников железнодорожного транспорта: опыт России и других стран / В. А. Логинова, Ю. Н. Каськов, Е. А. Жидкова [и др.] // Анализ риска здоровью. – 2021. – № 1. – С. 173–185.

4 **Voix, J.** Individual Fit Testing of Hearing Protection Devices / J. Voix, L. Hager // International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE). – 2009. – Vol. 15, № 2. – P. 211–219.

5 **El Dib, R. P.** Interventions to promote the wearing of hearing protection / R. P. El Dib, J. L. Mathew, R. H. Martins // Cochrane Database Syst Rev. – 2012. – № 18 (4). – P. CD005234.

6 **Chiu Chien-Chen.** Individual Fit Testing of Hearing-Protection Devices Based on Microphones in Real Ears among Workers in Industries with High-Noise-Level Manufacturing / Chiu Chien-Chen, Wan Terng-Jou // Int J Environ Res Public Health. – 2020. – № 17 (9). – P. 3242. – DOI: 10.3390/ijerph17093242. PMID: 32384734. – PMCID. – PMC7246836.

7 Noise Attenuation of Earplugs as Measured by hREAT and F-MIRE Methods in a Japanese Metal Manufacturing Plant / Isamu Kabe, Takeshi Kochi, Hiroko Tsuruoka [et al.] // J Occup Health. – 2012. – № 54. – P. 310–315.

8 Проблема реальной эффективности индивидуальной защиты и привносимый риск для здоровья работников (обзор литературы) / Э. И. Денисов, Т. В. Морозова, Е. Е. Аденинская, Н. Н. Курьеров // Медицина труда и промышленная экология. – 2013. – № 4. – С. 18–25.

9 **Капцов, В. А.** Повышение эффективности средств индивидуальной защиты органов слуха / В. А. Капцов, В. Б. Панкова, А. В. Чиркин // Лечебно-реабилитационные перспективы при слухоречевых и голосовых расстройствах : Второй Всерос. конгресс с междунар. участием, Москва, 17 мая 2022 г. – URL: https://www.researchgate.net/publication/360777777_Povysenie_effektivnosti_sredstv_individualnoj_zasity_organa_sluha_Improving_the_effectiveness_of_hearing_protective_devices (дата обращения: 12.09.2026).

10 **Berger, E.** International review of Field Studies of Hearing Protection Attenuation / E. Berger, J. Franks, F. Lindgren // Scientific basis of noise-induced hearing loss. – Thieme Medical Publishers, 1996. – P. 361–377.

11 Акустическая эффективность средств защиты от шума / С. П. Драган, В. Н. Зинкин, А. В. Боговолов [и др.] // Медицинская техника. – 2013. – № 3 (279). С. 34–36.

УДК 691.33:504.05

ГЕОПОЛИМЕРНЫЙ БЕТОН – ОДИН ИЗ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

В. С. МАТВЕЙЧИКОВА, Я. В. ЯНКОВЕЦ, К. И. ХУДЕНКО, А. А. ВАСИЛЬЕВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Сегодня одним из ключевых факторов ухудшения экологической обстановки называют выбросы CO_2 в атмосферу. Глобальные выбросы углекислого газа достигают 37–41 млрд т в год. Крупнейшие страны-эмитенты – Китай (около 32 % мировых выбросов) и США (около 13 %).

Основные показатели по странам: Китай ~12,6 млрд т (8,89 т на человека); США ~4,8 млрд т (14,21 т на человека); Индия ~2,7 млрд т (1,89 т на человека); Россия ~1,9 млрд т (13,11 т на человека). В Беларуси годовой объем выбросов составляет ~57,4 млн т CO_2 (~6,2 т на человека).

Выбросы CO_2 достигли исторического максимума, превысив 40 млрд т в 2023 г. Увеличение показателей связано с ростом потребления ископаемого топлива. Потребление углеводородов возросло на 1,5 % до 505 эксаджоулей. Использование угля увеличилось на 1,6 %, а нефти – на 2 %, достигнув рекордных 100 млн баррелей в сутки.

В нашей стране ежегодно производится около 5,5 млн т цемента. Производство цемента является источником 5–7 % выбросов CO_2. Производство 1 т портландцементного клинкера сопровождается выбросом 0,8–0,9 т CO_2, из которых 60 % выбросов происходит вследствие преобразования сырья при высоких температурах, 40 % – результаты сжигания топлива при нагреве материалов до нужных температур [1].

Улучшение качества жизни вызывает необходимость постоянного увеличения выработки электроэнергии, что в свою очередь требует увеличения мощностей тепловых электростанций.

В процессе работы в топках тепловых электростанций (ТЭС), теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) и котельных образуются золошлаковые отходы (ЗШО), которые на 90–99 % состоят из оксидов кремния, алюминия, железа и кальция, часто содержат редкие металлы.

ЗШО складируются в золоотвалах, представляют сложные гидротехнические сооружения к изготовлению и эксплуатации которых предъявляются жесткие требования. Устройство золоотвалов требует значительных затрат на рекультивацию земель и очистку стоков.

В Республике Беларусь размещено 11 золоотвалов общей мощностью 34 904,95 тыс. т в год и общей площадью в 46,9593 га. Несмотря на то, что объем образования золошлаковых отходов в стране в 2021 г. значительно сократился, объем таких отходов всё же высок [2].

В РФ ежегодно перерабатывается около 30 % ЗШО, В Китае – более 80 %, в странах Европы и в Японии – 90–100 % [3].

Один из самых перспективных вариантов переработки ЗШО – производство строительных материалов. В свою очередь среди конструкционных материалов, первое место занимает геополимерный бетон (ГПБ). ГПБ – бесклинкерный материал, получаемый химической активацией алюмосиликатных компонентов щелочными агентами. Сырьем для ГПБ являются золы-уносы ТЭЦ, доменные гранулированные шлаки, метакаолин и другие техногенные продукты.

Эффективность использования ГПБ рассмотрим в сравнении с полимерцементным бетоном (ПЦБ). Так, при производстве ПЦБ выбросы CO_2 на 1 т вяжущего составляют 0,0–0,9 т, при производстве ГПБ – 0,15–0,20 т; энергоемкость производства ПЦБ – 100 (базовая величина), производства ГПБ – 30–40 %; использование техногенных отходов при производстве ПЦБ – 20–25 %, при изготовлении ГПБ – 80–90 %; температура обжига сырья для ПЦБ – 1450 °С, для ГПБ обжиг сырья не требуется (80–90 °С).

В нашей стране производство ГПБ на основе местного сырья (крупнотоннажных отходов промышленности), например – золы-уноса ТЭЦ (Минская ТЭЦ-4), доменных гранулированных шлаков и метакаолина из местных глин (Столинское месторождение), позволяет сократить углеродный след на 75–80 %.

Таким образом, производство и массовое применение ГПБ позволяет качественно метаморфировать строительную отрасль: уменьшить поглощение O_2, и выделение CO_2; значительно уменьшить количество использования природного сырья и повысить долю использования промышленных отходов.

Список литературы

1 **Ерошкина, Н. А.** Геополимерные вяжущие на базе магматических горных пород и бетоны на их основе / Н. А. Ерошкина, М. О. Коровкин // Цемент и его применение. – 2014. – № 4. – С. 107–113.

2 Что делать с золоотвалами? // Обращение с отходами. – URL: https://ecologia.by/number/2022/10/ Chto_delat_s_ zolootvalami_/ (дата обращения: 20.07.2026).

3 Когда начнем использовать золошлаковые отходы? // Dprom.online. – URL: https://dprom.online/processing/kogda-nachnyom-ispolzovat-zoloshlakovye-othody/ (дата обращения: 20.07.2026).

УДК 551.583:341.24

ПРОБЛЕМА УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ И ДРУГИХ СТРАН ЕАЭС

Е. В. МЕДВЕДЕВА, Д. ТЕРЗИ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Введение Европейским союзом Механизма углеродного регулирования на границе (CBAM) с 2026 года ставит углеродоемкость продукции в прямую экономическую зависимость от конкурентоспособности национальных экспортеров [1]. Данный вызов особенно актуален для стран ЕАЭС, экономика которых ориентирована на экспорт энергоресурсов и углеродоемкой промышленной продукции. Беларусь, являясь членом ЕАЭС и поддерживая значительные торговые связи с ЕС, оказывается в центре этих процессов. Это обусловливает своевременность и актуальность комплексного анализа ее углеродного следа [1].

Целью исследования являются определение ключевых проблем формирования углеродного следа в Беларуси и странах ЕАЭС, а также оценка перспектив гармонизации углеродного регулирования. Задачи включают анализ динамики выбросов парниковых газов в Беларуси, оценку влияния CBAM на экспорт стран ЕАЭС, сопоставление систем углеродного регулирования Беларуси и России, а также выявление направлений декарбонизации и интеграции.

Анализ динамики выбросов в Беларуси показывает тенденцию к снижению (рисунок 1). В 2023 году общие выбросы парниковых газов (исключая категорию «земельное использование, изменение видов угодий и лесное хозяйство» (ЗИЗЛХ)) составили 84,3 млн тонн CO_2-экв., что на 40 % ниже уровня 1990 года. Территориальные выбросы CO_2 в 2024 году достигли 55,8 млн тонн, а на душу населения – 6,16 тонны [2]. Однако углеродоемкость экономики страны остается высокой: 0,331 т CO_2-экв./тыс. дол. ВВП (по ППС) против 0,133 в ЕС-27. С 1751 года общий объем эмитированного Беларусью CO_2 составляет 5,18 млрд тонн, что эквивалентно 0,28 % глобальных выбросов. Среднестатистический житель страны в 2024 году эмитировал 10,4 тонны CO_2-экв. с учетом всех видов парниковых газов [2].

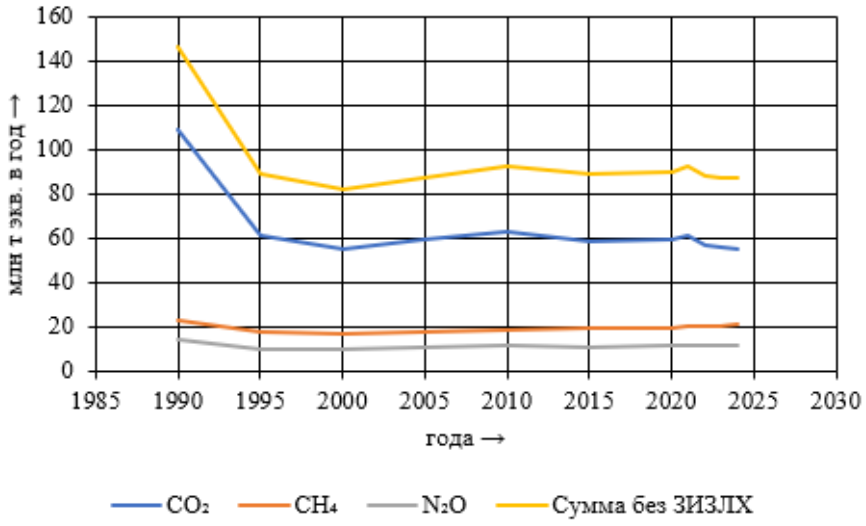


Рисунок 1 – Динамика выбросов парниковых газов в Республике Беларусь, 1990–2024 гг.

Выбросы CO_2 в Беларуси снизились со 108,5 млн тонн в 1990 году до 54,8 млн тонн в 2024 году. Выбросы метана сократились с 23,1 до 20,7 млн тонн, закиси азота – с 14,4 до 11,2 млн тонн [3]. Общее сокращение выбросов парниковых газов (без учета поглощения лесами и землепользование) составило со 146,0 до 87,1 млн тонн CO_2-экв. [3]. Основной вклад в это сокращение внес сектор энергетики (уменьшение на 49,0 % по сравнению с 1990 годом), что обусловлено снижением объемов производства и внедрением энергосберегающих мероприятий [4].

Основная доля выбросов парниковых газов в Беларуси в 2023 году приходится на энергетику (56 %). Сельское хозяйство занимает второе место (23 %), промышленность – 7 %, отходы – 7 % (рисунок 2) [5]. В рамках сельского хозяйства доминируют процессы внутренней ферментации у сельскохозяйственных животных (44,5 %) и эмиссия закиси азота из почв (43,8 %). Чистое поглощение углерода лесами и землепользованием составило 41,3 млн тонн CO_2-экв. Отмечается тенденция к снижению поглощающей способности экосистем со скоростью 2,03 млн тонн CO_2 в год, особенно выраженная на юго-востоке страны.

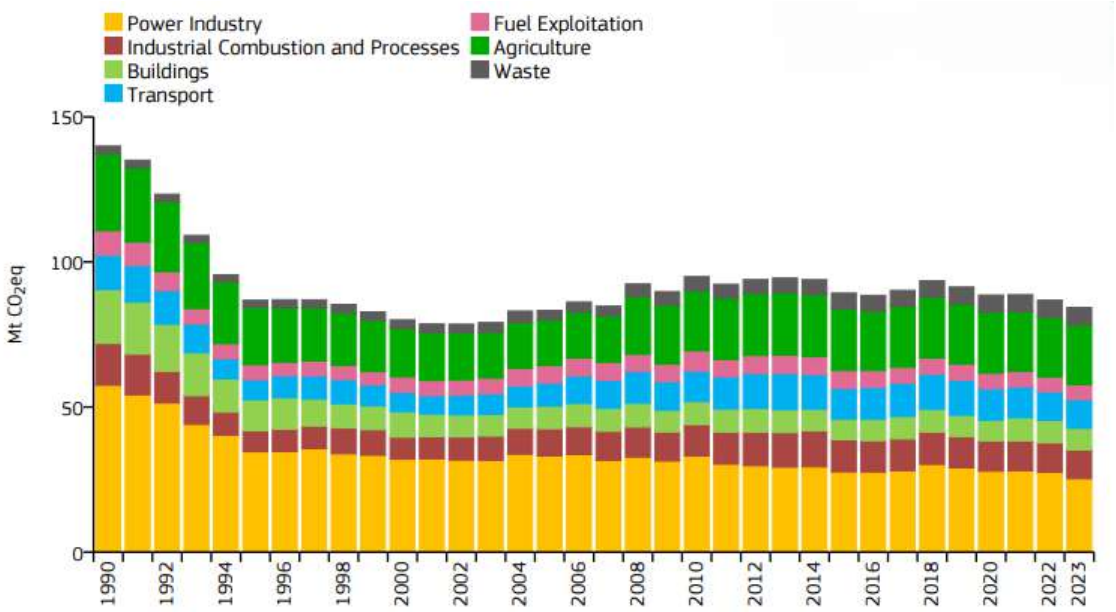


Рисунок 2 – Выбросы парниковых газов по секторам экономики Республики Беларусь, 2023 [5]

Важным фактором является введение механизма регулирования углеродных границ (CBAM) ЕС, оказывающее влияние на экспортные потоки. Предполагается, что наибольшие платежи по CBAM придутся на Узбекистан, Грузию, Таджикистан и Беларусь. В случае Беларуси, доля импорта в ЕС, попадающего под действие CBAM, оценивается в 8–14 %, причем основная часть платежей (около 53,9 %) будет приходиться на электроэнергию и удобрения (таблица 1). Учитывая действующие санкции ЕС, эта доля может варьироваться от 8,4 до 25,4 %, с ключевым вкладом электрической энергии, карбамида и нефтехимической продукции.

Таблица 1 – **Доля импорта в ЕС, попадающего под CBAM, для стран ЕАЭС, 2019–2021 гг. [1]**

Торговый партнер	Торговые потоки без санкций				Торговые потоки с санкциями			
	Предложение ЕК	Предложение ЕП	Предложение Совета	Наихудший сценарий	Предложение ЕК	Предложение ЕП	Предложение Совета	Наихудший сценарий
Армения	15,7	15,8	15,7	68,5	–	–	–	–
Беларусь	20,2	23,7	21,0	52,9	8,4	13,9	9,6	25,4
Грузия	7,1	7,9	7,2	66,8	–	–	–	–
Казахстан	1,2	1,3	1,2	95,9	–	–	–	–
Кыргызстан	0,0	0,0	0,0	1,5	–	–	–	–
Россия	7,7	9,5	7,8	87,3	13,3	16,3	13,5	75,4
Таджикистан	25,2	25,2	25,2	73,4	–	–	–	–
Узбекистан	3,6	11,4	4,1	44,0	–			

Сравнительный анализ систем углеродного регулирования Беларуси и России выявил, что обе страны являются участницами Парижского соглашения. Россия располагает системой торговли квотами на выбросы парниковых газов и экспериментальным проектом на острове Сахалин. В Беларуси, несмотря на менее развитые рыночные механизмы, действует норматив ЭкоНиП, устанавлива-

ющий количественные пределы выбросов, что создает основу для учета выбросов на уровне производственных процессов.

Интеграция климатической политики в рамках ЕАЭС сталкивается с вызовами, включая расхождения в стандартах, ограниченную интеграцию финансовых ресурсов и недостаток инвестиций (рисунок 3). Однако существуют и позитивные факторы, такие как наличие национальных стратегий устойчивого развития и разработанная модель таксономии зеленых проектов.

Анализ экономических последствий введения ценообразования на выбросы углерода для стран ЕАЭС предполагает, что системы торговли выбросами (ETS) могут быть более предпочтительны, чем углеродный налог. Ожидается рост производства в химической и металлургической отраслях. Для Беларуси участие в региональной ETS может способствовать снижению затрат на декарбонизацию.

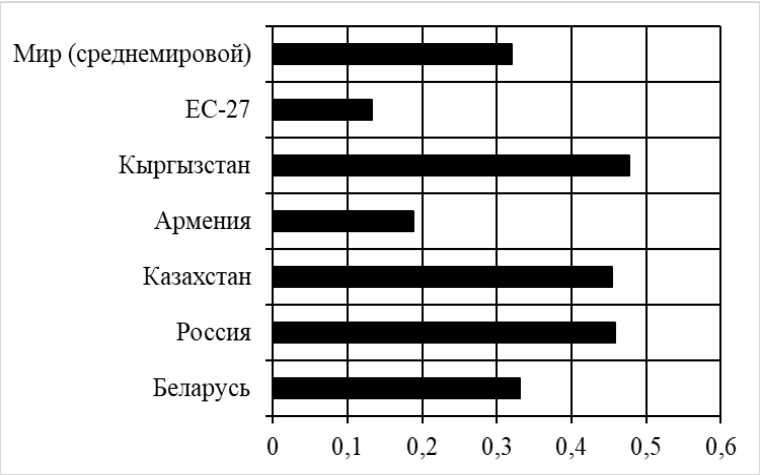


Рисунок 3 – Сравнение углеродоемкости экономики стран ЕАЭС и ЕС, 2023 г.

Перспективы снижения углеродного следа включают повышение энергоэффективности и развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности биомассы и биогаза, что может обеспечить до 56 % снижения потребления ископаемого топлива. Атомная энергетика также рассматривается как вариант – ввод в эксплуатацию Белорусской АЭС позволил сократить зависимость от импорта природного газа. Сроки достижения углеродной нейтральности варьируются: Армения и Кыргызстан планируют достичь этого к 2050 году, Россия и Казахстан – к 2060 году. Эффективная декарбонизация требует гармонизации климатических стандартов и формирования единой системы мониторинга выбросов.

Таким образом, проблема углеродного следа в Республике Беларусь и ЕАЭС комплексная. Наблюдается прогресс в сокращении выбросов, но он сопряжен с высокой углеродоемкостью экономик и потенциальными рисками, связанными с CBAM ЕС. Решение данной проблемы требует скоординированных усилий по гармонизации регуляторных подходов, развитию «зеленого» финансирования и технологической модернизации.

Список литературы

1 **Sudakov, S.** Effects of the EU's CBAM on Eurasian Countries / S. Sudakov // Istanbul Journal of Economics. – 2023. – Vol. 73, № 2. – P. 675–696.

2 **Ritchie, H.** Belarus: CO_2 and Greenhouse Gas Emissions / H. Ritchie, P. Rosado // Our World in Data. – 2025. – URL: https://ourworldindata.org/profile/co2/belarus (date of access: 13.09.2026).

3 Временные ряды данных по показателям за период 1990–2024 гг., Таблица В-3: Выбросы парниковых газов: Беларусь / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Минск : Белстат, 2026.

4 Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2023 гг. / Респ. науч.-исслед. унитар. предприятие «Бел НИЦ «Экология». – Минск : Бел НИЦ «Экология», 2025. – 338 с.

5 **Crippa, M.** GHG emissions of all world countries / M. Crippa, D. Guizzardi, F. Pagani [et al.]. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2024. – 273 p.

УДК 623.437

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ И ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОХРАНЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА АЭРОДРОМЕ

Д. Ю. МЯГКОВ
Белорусская государственная академия авиации, г. Минск

Мероприятия по охране окружающей среды, проводимые на аэродроме, включают в себя организационные, организационно-технические и лесохозяйственные.

Наиболее эффективным приемом уменьшения массы выброса загрязняющих веществ является руление воздушного судна (ВС) на части работающих двигателей или применение буксировщика для транспортировки самолета, что позволяет добиться перераспределения поля концентрации загрязняющих веществ в зоне аэродрома и снизить концентрацию загрязняющих веществ на прилегающей к нему населенной местности.

Применение взлета ВС на номинальном режиме работы двигателей дает существенное снижение выброса оксидов азота в зоне аэродрома.

Организационные и организационно-технические мероприятия:

– исключение рубки зеленых насаждений за границей площади, отведенной для соответствующих работ;

– сбережение элементов растительных сообществ (деревьев, кустарников, напочвенного покрова) за границей площади, отведенной для строительных работ;

– введение запрета на проведение огневых работ, в особенности выжигания территории и сжигание мусора на участках за границей площади, отведенной для строительных работ и на территориях высокой пожароопасности;

– проведение мероприятий в древесных насаждениях, примыкающих к планируемым площадкам строительства, способствующих поддержанию их устойчивости и восстановлению поврежденных: санитарные рубки, рубки ухода, переформирования, ландшафтные рубки;

– недопущение захламленности выделов порубочными остатками на опушке леса во избежание лесных пожаров, строительным и другим мусором, песком.

Кроме того, изложенные мероприятия по обращению с отходами в области предотвращения и снижения потенциальных неблагоприятных воздействий на земельные ресурсы, почвы также будут направлены на предотвращение и снижение потенциальных неблагоприятных воздействий на растительность.

Воздействие на объекты аэродрома можно минимизировать посредством проведения мер, направленных на предотвращение попадания птиц в работающие двигатели авиационных судов, а также их комбинаций и дополнений. Учитывая факт того, что даже единичная особь птицы, попадая в работающий авиационный двигатель, способна представлять особую угрозу безопасности экипажа воздушного судна, личному составу батальона аэродромного и материального обеспечения, следует продолжать применять в пределах территории аэродрома существующие щадящие меры, направленные на отпугивание птиц (биоакустические установки, ружья, ракетницы, газовые пушки, трещотки, зеркальные шары, сети, пугала, флажки, ленты, чучела) при взлетах и посадках. Комбинация, чередование и дополнение существующих мер способны значительным образом повысить степень эффективности используемых методов.

Необходимо уделить особое внимание и мероприятиям по предотвращению загрязнения компонентов окружающей среды отходами производства.

Для предотвращений и снижения потенциальных неблагоприятных воздействий отходов производства на компоненты окружающей среды следует предусмотреть следующее:

– сбор отходов, образующихся в результате эксплуатации объекта, раздельно по видам, классам опасности и другим признакам, обеспечивающим их использование в качестве вторичного сырья, обезвреживание и экологически безопасное захоронение. Сбор и хранение отходов производства определяются их физическим состоянием, химическим составом и классом опасности отходов;

– контроль за сбором и утилизацией твердых бытовых отходов, вывоз отходов на объекты обезвреживания отходов, недопущение образования неорганизованных свалок мусора на территории военных городков и по внешнему периметру ограждения воинских частей;

– передачу вторичных материальных ресурсов;

– проведение регулярного контроля над осуществлением раздельного сбора образующихся отходов на местах в соответствии с инструкцией об обращении с отходами производства и инструкцией о производственном контроле;

– идентификацию мест временного хранения отходов производства;

– контроль своевременного вывоза отходов производства на объекты по использованию, хранению, обезвреживанию и (или) захоронению отходов;

– организацию сбора отработанных нефтепродуктов в соответствии с приказом Министерства обороны Республики Беларусь от 25 июля 2005 г. № 17 «Об утверждении Инструкции о порядке сбора, сдачи и использования отработанных нефтепродуктов в Вооруженных Силах Республики Беларусь» (Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь, 2005 г., № 126, 8/12990);

– проведение по завершению учений и тактических занятий совместно с представителями местных исполнительных и распорядительных органов (руководством полигонов) экологического обследования районов (участков местности) проведения учений (тактических занятий) с составлением актов экологического обследования, оперативное устранение выявленных нарушений природоохранного законодательства Республики Беларусь.

Только при обеспечении обращения с отходами в строгом соответствии с требованиями законодательства, а также строгом производственном экологическом контроле можно будет предупредить негативное воздействие отходов на компоненты природной среды.

Необходимо выполнить мероприятия в области предотвращения, снижения неблагоприятного воздействия авиационного шума.

Предотвращение прогнозируемого неблагоприятного воздействия авиационного шума, который влияет на здоровье населения, проживающего вблизи приаэродромной территории, может быть достигнуто путем переноса жилой застройки, попадающей в зону, где, по прогнозной оценке, не будут соблюдаться установленные законодательно допустимые уровни авиационного шума.

Обязательными мероприятиями по предотвращению и снижению воздействия авиационного шума вблизи аэродрома являются следующие:

– организация и ведение мониторинга шума при помощи стационарных или передвижных систем контроля авиационного шума;

– строгое соблюдение экипажами ВС установленных схем набора высоты, выхода из зоны аэродрома, снижения и захода на посадку;

– разработка и обязательное применение специальных эксплуатационных приемов выполнения малошумных процедур при взлете по каждому установленному маршруту для конкретных типов ВС.

Все мероприятия должны быть указаны в Инструкции по производству полетов.

Организационные мероприятия по охране окружающей среды аэродромного комплекса:

– назначение постоянно действующей комиссии по предотвращению отрицательного воздействия войск на окружающую среду, а также нештатного инспектора по охране окружающей среды;

– изучение требований законодательства Республики Беларусь об охране окружающей среды и природных ресурсов, руководящих документов об организации охраны окружающей среды в Вооруженных Силах Республики Беларусь;

– проведение ежеквартальных проверок состояния окружающей среды с предоставлением отчетных документов командиру авиационной базы;

– проведение ежеквартального анализа состояния экологической обстановки с составлением актов экологического обследования проверяемых объектов;

– планирование занятий по экологической подготовке со всеми категориями военнослужащих;

– контроль соблюдения в подразделениях войсковой части требований законодательства Республики Беларусь и выполнения мероприятий по охране окружающей среды;

– планирование мероприятий по охране окружающей среды, определение функциональных обязанности нештатного инспектора по охране окружающей среды.

– учет источников ионизирующего излучения, контроль их хранения и эксплуатации.

Список литературы

1 **Борисов, Н. И.** Авиационная экология : в 5 ч. / Н. И. Борисов. – Воронеж : ВВАИИ, 1998.

2 **Цупко, Н. И.** Аэродромы и экология / Н. И. Цупко // Авиация и космонавтика. – 1993. – № 7. – С. 10–11.

3 Об охране окружающей среды : Закон Республики Беларусь от 26 ноября 1992 года № 1982-XII // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=v19201982 (дата обращения: 12.09.2026).

УДК 621.3

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ В БЕЛАРУСИ

В. М. ОВЧИННИКОВ, В. В. МАКЕЕВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Энергетика является основой развития экономики любой страны. Электрификация – главная движущая сила глобальной энергетической системы. В настоящее время человечество столкнулось с беспрецедентными экологическими проблемами: быстрые темпы экономического роста, повышение производительности труда и, следовательно, интенсивное потребление природных ресурсов (причём из огромного количества вещества, изымаемого из природной среды для целей производства, в конечный продукт превращаются лишь 1,5–2,0 %). Экологические проблемы привели к серьезному ухудшению состояния окружающей среды и климатическим изменениям. Причины и механизмы глобального потепления пока ещё чётко не установлены, однако очевидно, что накопление в атмосфере парниковых газов, по большей части углекислого газа, – его основная причина, поскольку в ходе промышленных процессов и человеческой деятельности CO_2 выбрасывается в атмосферу в огромных количествах.

По данным Европейского агентства по окружающей среде установлено, что Европа нагревается гораздо быстрее, чем весь остальной мир. Температура в среднем повысилась на 2,3 °С по сравнению с показателями столетней давности, опережая глобальное повышение на 1,3 °С [1].

В 2015 году было принято Парижское соглашение по климату, которое направлено на сдерживание роста глобальной средней температуры. Для обеспечения благосостояния населения в настоящее время используется углеводородная энергетика, топливом для которой является уголь, нефтепродукты и природный газ, а также энергетика, применяющая возобновляемые источники энергии (ВИЭ), и ядерная энергетика.

Возобновляемые источники энергии. Низкоуглеродное развитие – необходимый шаг для смягчения нагрузки на окружающую среду. Для географических и геологических условий размещения Республики Беларусь стратегию «низкий углеродный след» можно осуществить с помощью двух различных видов электростанций: атомной и на основе ВИЭ, а именно ветроэлектростанций. Однако, как показывают исследования [2], четыре фактора сдерживают развитие ВИЭ: стоимость, хранение, масштаб и землепользование. Наиболее значимой является проблема стоимости.

Подсчитано, что для турбины мощностью 5 МВт требуется стали: 150 т – для железобетонного фундамента, 250 т – для ступиц ротора и для гондол (где устанавливаются редуктор и генератор), а также 500 т – для башен [3]. Если к 2030 г. электричество, вырабатываемое ветровыми электростанциями, будет обеспечивать 25 % мировой потребности, то даже при таком высоком коэффициенте установленной мощности, как 35 %, для генерации приблизительно 2,5 ТВт потребуется около 450 млн т стали. И это без учета металла, который пойдет на изготовление башен, проводов и трансформаторов для новых высоковольтных линий электропередачи, необходимых для подключения ветрогенераторов к энергосистеме.

В результате значительно повышены цены на электрическую энергию даже при частичном использовании ВИЭ в Германии. Стоимость электроэнергии в Германии – одна из самых высоких в Европе (около 37,2 цента за кВт·ч, в Беларуси, например, 8,7 евроцента за кВт·ч. Цены на электроэнергию для компаний среднего размера, на долю которых приходится бóльшая часть производства страны, выросли вдвое. Высокие цены привели к потере рабочих мест в производственном секторе. Аналогичная картина наблюдается в Канаде и Австралии.

Землепользование также является значимым препятствием в условиях Беларуси для реализации перехода к полностью возобновляемой энергетике. Для установки ветрогенераторов с учетом ветровой нагрузки пригодны около 1840 площадок, в основном в Могилевской и Гродненской областях. Потенциал ветроэнергетики оценивается в 1600 МВт установленной мощности, что может обеспечить выработку около 6,5 млрд кВт·ч в год. Это составляет примерно 15 % от общего потребления электроэнергии в стране. Вместе с тем потребности экономики республики возрастают в связи с внедрением новых производств, применением IT-технологий и искусственного интеллекта.

Исследования показывают, что все сценарии перехода на полностью возобновляемую энергию, предлагаемые политиками и экологическими группами, не имеют под собой научного обоснования. Профессор физики Кембриджского университета (Англия) Маккей в своих научных докладах отметил: «В разговорах о возобновляемой энергии очень много чепухи, очень много зелёного камуфляжа, вводящей в заблуждение рекламы». Свои убеждения профессор Маккей заключает фразой: «Мне нравится возобновляемая энергия. Но мне нравится и арифметика». В настоящее время солнечная и ветровая энергия ещё не в состоянии заменить энергию, которое ископаемое топливо обеспечивает сегодня.

Ядерная энергетика. Использование ядерной энергии в мирных целях прошло путь как подъёма интереса в обществе, так и спада. В эксплуатацию были введены первые АЭС в Обнинске (СССР, 1954 г.), Колдер-Холле (Великобритания, 1956 г.), Шиппингпорте (США, 1957 г.). В течение нескольких следующих лет было сооружено более 50 атомных электростанций [5]. Это позволило главе комиссии по атомной энергии США сказать: «Через 15 лет ядерная энергетика сделает энергию настолько дешёвой, что можно будет не ставить счётчики». Атомная энергия, по некоторым прогнозам, должна была к началу XXI века давать половину всей электроэнергии, производимой в США. Но, как оказалось, ядерная энергия не так дешева. Конструкции АЭС не были стандартизированы, и была значительно усилена безопасность. Это привело к увеличению стоимости. Глобальной проблемой атомной электростанции является безопасность её функционирования, причём этим вопросом после аварий на АЭС начали интересоваться не только политики и инженеры, но и широкая общественность. В результате популярность АЭС уменьшилась.

В мае 2019 г Международное энергетическое агентство (МЭА) подтвердило свою поддержку ядерной энергетике заявив, что без увеличения объёмов ядерной энергетики резко возрастут глобальные выбросы углекислого газа и в электроэнергетический сектор развитых стран потребуются значительные дополнительные инвестиции. Так, в странах с развитой экономикой это вызовет повышение цен на производимые товары, поскольку ВИЭ не смогут восполнить разрыв между действующей и требуемой энергетикой.

В Беларуси в 2023 г построена АЭС, которая состоит из двух энергоблоков ВВЭР-1200 суммарной мощностью 2400 МВт. Энергоблок ВВЭР-1200 (водо-водяной энергетический реактор) относится к классу реакторов на тепловых нейтронах (на Чернобыльской АЭС был установлен другой тип – РБМК). Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) Белорусской АЭС, или отношение фактически выработанного объёма электроэнергии к теоретически возможному, составляет около 92 %, КПД АЭС – 37 %. Срок службы оборудования реакторной установки Белорусской атомной электростанции 60 лет.

В настоящее время самым большим препятствием на пути развития ядерной энергетики является стоимость. Государственные компании – единственные, кто способен создавать новые значительные мощности в этой отрасли. Модель с государственной поддержкой наиболее развита в Китае, который строит АЭС больше, чем какая-либо другая страна в мире. На его долю приходится более половины всех сооружаемых в мире атомных мощностей. В год в Китае вводится 7–8 энергоблоков. Индийское правительство тоже заявляет 12 новых АЭС, где будут использованы собственные индийские реакторы, а также реакторы российского производства. В Индии вводится 5–6 энергоблоков в год. Российская Федерация – бесспорный мировой лидер в области экспорта технологий атомной энергетики. Государственная корпорация «Росатом» строит АЭС в 28 странах. При использовании ядерного топлива расходы на его транспортировку пренебрежимо малы. Ядерное топливо можно возить в самолёте 1–1,5 раза в год без всяких экономических обременений. Сегодня вклад стоимости природного урана в мощностях АЭС составляет не более 4 %, а вклад стоимости наиболее безвредного для окружающей среды природного газа в мощность ТЭС – 70 %. Будущее атомной энергетики связано с переходом к реакторам такого типа, которые нельзя привести во взрывоопасное состояние неправильным нажатием кнопки или поворотом ключа на пульте управления, как было в Чернобыле, где всё работало и не было ни единого отказа, но конструкция была такова, что в результате действий персонала реактор взорвался [4].

Для будущей крупномасштабной ядерной энергетики мы должны строить такие реакторы, которые были бы устойчивы не только к ошибочным действиям персонала, отказам оборудования и сочетанию этих факторов (это обеспечивается в современных АЭС последнего поколения), но и к злонамеренным действиям.

В заключение следует указать на несколько положений, касающихся будущего развития ядерной энергетики.

Существующая ядерная энергетика, основанная на использовании в основном корпусных реакторов с водой под давлением (ВВЭР, PWR), сегодня представляет собой зрелую, эффективно работающую ядерную энергетическую технологию.

Постепенное удорожание природного урана, вызванное увеличением масштабов его потребления из-за роста суммарной мощности АЭС и истощением дешёвых ресурсов, требует развития ядерных энергетических технологий, основанных на использовании быстрых реакторов (реакторов на быстрых нейтронах), которые позволят расширить топливную базу ядерной энергетики в 100 раз. Это займёт довольно длительный временной интервал, продолжительность которого может составить более 50 лет. При этом безопасность должна находиться на социально приемлемом уровне.

Ядерные энергетические технологии с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем имеют наибольшие предпосылки для решения основных проблем, стоящих перед ядерной энергетикой будущего: безопасность и экономика.

Использование быстрых реакторов с твердым жидкометаллическим теплоносителем создаёт предпосылки для существенного упрощения конструкции реакторной установки, а значит значительного удешевления её за счет исключения многих уже ненужных систем безопасности, которые ранее были необходимы.

Для допуска на международный рынок необходима конкурентная стоимость электроэнергии, поскольку качество её стандартное. Основные усилия должны быть направлены на снижение удельных капитальных затрат, вносящих доминирующий вклад в себестоимость электроэнергии, и уменьшение срока строительства АЭС.

Энергетика является фундаментом экономического развития, однако её рост сопровождается серьёзными экологическими проблемами, прежде всего накоплением парниковых газов и глобальным потеплением. Возобновляемые источники энергии в Республике Беларусь, несмотря на свою экологичность, пока не способны полностью заменить традиционную энергетику из-за высокой стоимости, проблем землепользования. Ядерная энергетика, напротив, демонстрирует высокую эффективность, а её развитие, особенно через реакторы на быстрых нейтронах, способно обеспечить безопасное и экономически оправданное расширение топливной базы на десятилетия вперёд. Для успешного будущего атомной энергетики ключевыми задачами остаются снижение капитальных затрат, сокращение сроков строительства и обеспечение конкурентоспособной стоимости электроэнергии на международном рынке.

Список литературы

1 **Овчинников, В. М.** Энергетическая устойчивость и сопутствующая экологическая безопасность / В. М. Овчинников, В. В. Макеев // Энергоэффективность. – 2024. – № 7.

2 **Брайс, Р.** Богатство наций: электричество и потребности мира / Р. Брайс. – М. : Эксмо, 2025. – 400 с.

3 **Смил, В.** Цифры не лгут: 71 факт, важный для понимания всего на свете : пер. с англ. / В. Смил. – М. : КоЛибри, Азбука-Аттикус, 2022. – 320 с.

4 **Тошинский, Г. И.** Беседы о ядерной энергетике. Физика реакторов и технологии модульных быстрых реакторов с теплоносителем свинец-висмут / Г. И. Тошинский. – М. : РГ-Пресс, 2025. – 480 с.

5 **Ергин, Д.** В поисках энергии: ресурсные войны, новые технологии и будущее энергетики : пер. с англ. / Д. Ергин. – М. : Альпина ПРО, 2023. – 720 с.

УДК 628.517.2:504.6

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ШУМОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ПРИМАГИСТРАЛЬНЫЕ БИОЦЕНОЗЫ

Д. И. РЯБИНА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Экологическое воздействие железнодорожных линий не ограничивается изменением местообитаний, вибрацией и риском столкновения животных с подвижным составом. Существенную роль играет акустическая нагрузка, особенно на территориях, где жизнедеятельность животных связана со звуко-

вой коммуникацией. Шум движущегося состава изменяет акустическое пространство примагистральных биоценозов и способен влиять на передачу сигналов между особями, кормовое поведение и пространственное распределение животных. Цель настоящей работы – систематизировать экологические последствия железнодорожного шума и определить показатели, которые целесообразно учитывать при мониторинге примагистральных территорий.

Железнодорожный шум имеет выраженную пространственно-временную неоднородность. Его формируют взаимодействие колес и рельсов, работа тягового оборудования, торможение, аэродинамические процессы при высоких скоростях, а на отдельных участках – звуковые сигналы. В отличие от непрерывного потока на загруженной автомобильной дороге, прохождение поездов обычно создает чередование шумовых событий и относительно тихих интервалов. Экологический результат определяется не одним усредненным уровнем звука, а сочетанием максимальных уровней, длительности событий, количества проходов, времени суток и спектрального состава. В рекомендациях Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) железнодорожный шум выделяется как самостоятельный вид транспортного воздействия [1], а Европейское агентство по окружающей среде указывает, что шумовое загрязнение способно влиять и на поведение диких животных [2].

Для организмов, использующих акустические сигналы, одним из основных механизмов воздействия является маскировка биологически значимых звуков. На фоне низко- и среднечастотного транспортного шума уменьшается дальность восприятия брачных и территориальных сигналов, сигналов тревоги, контакта между родителями и потомством. Возможная реакция включает повышение громкости или частоты вокализации, перенос активности на более тихие периоды, увеличение настороженности либо уход с участка. Такие изменения требуют дополнительных энергетических затрат и способны сокращать время кормодобывания и отдыха. Метаанализ экспериментальных исследований показал выраженные реакции на антропогенный шум у широкого круга животных – от членистоногих и амфибий до птиц и млекопитающих [3]. Следовательно, акустическое загрязнение нельзя сводить только к орнитологической проблеме, хотя птицы остаются наиболее изученной группой.

Экологические последствия проявляются на нескольких уровнях. На уровне особи это изменение поведения, физиологическая стресс-реакция и снижение эффективности коммуникации. На популяционном уровне возможны перераспределение особей относительно железнодорожной линии, изменение успешности размножения и выживаемости молодняка. На уровне сообщества различие в чувствительности видов способно менять видовой состав: акустически чувствительные виды уступают участки более толерантным, а перестройка отношений «хищник – жертва», конкуренции и межвидовой передачи сигналов затрагивает структуру биоценоза. Современная систематизация исследований воздушного антропогенного шума подтверждает, что чаще всего изучаются поведение, вокальная коммуникация, размножение, физиология и разнообразие; транспорт при этом является наиболее представленной группой источников шума [4].

Особого внимания требуют периоды размножения и выращивания потомства. В это время качество акустической связи связано с защитой территории, поиском партнера, предупреждением об опасности и кормлением птенцов. Метаанализ, опубликованный в 2026 г. и охвативший 160 видов птиц, выявил значимое влияние антропогенного шума на поведение и физиологию, а также выраженный отрицательный эффект на показатели размножения; сила реакции зависела от экологических признаков видов и типа гнездования [5]. Для примагистральных территорий это означает, что одинаковый акустический режим не следует автоматически считать одинаково безопасным для всех компонентов биоценоза.

Вместе с тем связь между близостью железной дороги и снижением биоразнообразия не является линейной. Железнодорожная полоса одновременно создает опушечный эффект, меняет освещенность и структуру растительности, формирует новые кормовые и укрывные микроместообитания. В исследовании лесных птиц на действующей железнодорожной линии в Польше численность и видовое богатство в период размножения были выше вблизи пути, несмотря на более высокий уровень шума; авторы связывали это с привлекательностью опушечных местообитаний и прерывистым характером прохождения поездов [6]. Этот результат принципиален для экологической оценки: присутствие животных возле пути еще не доказывает отсутствия шумового воздействия, но и расстояние от пути само по себе не является универсальным показателем экологического неблагополучия.

Для экологической оценки примагистральных территорий в работе предлагается использовать двухблочную схему мониторинга, объединяющую акустические и биологические показатели. В акустический блок целесообразно включить эквивалентный и максимальный уровни звука, частоту шумовых событий и долю ночных проходов. Биологический блок должен характеризовать тип местообитания, сезон, наличие гнездовых участков, состав индикаторных видов и степень их зависимости от звуковой коммуникации. Совместная регистрация этих показателей на нескольких расстояниях от железнодорожного пути позволяет более обоснованно отделять шумовое воздействие от опушечного эффекта и особенностей растительности.

Отдельная методическая проблема – отделение шума от сопутствующих воздействий железнодорожной инфраструктуры: вибрации, искусственного освещения, изменения растительности и фрагментации местообитаний. Поэтому при полевых обследованиях следует одновременно фиксировать интенсивность движения, тип подвижного состава, метеоусловия и характеристики биотопа, чтобы отделить собственно шумовой эффект от сопутствующих факторов.

Снижение экологического риска следует начинать с уменьшения шума в источнике: поддержания нормативного состояния колес и рельсов, устранения дефектов поверхности катания, применения более тихих тормозных решений и обоснованного управления скоростью на чувствительных участках. Шумозащитные сооружения необходимо проектировать так, чтобы не усиливать фрагментацию местообитаний и не препятствовать перемещению животных. В природных зонах важны сохранение защитных полос растительности, выявление участков размножения чувствительных видов и, при наличии экологического обоснования, ограничение наиболее шумных технологических операций в критические сезонные периоды.

Проведённый анализ показывает, что экологический эффект железнодорожного шума определяется не только его уровнем, но и режимом движения поездов, характеристиками местообитания и чувствительностью отдельных групп организмов. Поэтому универсальное «безопасное расстояние» от железнодорожного пути не может служить единственным критерием оценки. Более информативным представляется сочетание акустических измерений с сезонными наблюдениями за индикаторными видами, что позволяет выделять участки повышенного экологического риска и выбирать адресные меры шумозащиты.

Список литературы

1 Environmental Noise Guidelines for the European Region / World Health Organization. – Copenhagen : WHO, 2018. – 180 p.

2 Environmental noise in Europe 2025 / European Environment Agency. – Copenhagen : EEA, 2026. – 149 p.

3 **Kunc, H. P.** The effects of anthropogenic noise on animals: a meta-analysis / H. P. Kunc, R. Schmidt // Biology Letters. – 2019. – № 15 (11). – P. 20190649.

4 What is the evidence for the impacts of airborne anthropogenic noise on wildlife? / L. Terray, B. Petiteau, G.Dutilleux [et al.] // Environmental Evidence. – 2025. – № 14 (1). – URL: https://link.springer.com/article/10.1186/s13750-025-00368-3 (date of access: 11.09.2026).

5 Trait-mediated effects of anthropogenic noise on bird behaviour and fitness / N. L. Madden, K. L. Mills, K. M. Alofs [et al.] // The Royal Society Publishing. – 2026. – № 293 (2064). – URL: https://royalsocietypublishing.org/rspb/article/ 293/2064/20252521/480236/ Trait-mediated-effects-of-anthropogenic-noise-on (date of access: 11.09.2026).

6 Do Birds Avoid Railroads as Has Been Found for Roads? / J. Wiącek, M. Polak, M. Filipiuk [et al.] // Environmental Management. – 2015. – № 56 (3). – P. 643–652.

УДК 621.762

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

В. В. САВИЧ, А. М. ТАРАЙКОВИЧ, Р. П. ГОЛОДОК, Д. Ю. ВЕРБИЦКИЙ, О. О. КУЗНЕЧИК
Институт порошковой металлургии им. академика О. В. Романа, г. Минск, Республика Беларусь

Е. Е. ПЕТЮШИК
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Конструкционные, триботехнические и пористые детали и компоненты, полученные методами порошковой металлургии (ПМ), широко используются в подвижном составе, путевом хозяйстве и в автотракторной технике: втулки и вкладыши подшипников скольжения в колесных парах, тяговых

электродвигателях, буксах вагонов; тормозные накладки и диски для моторвагонного подвижного состава, трамваев и метро; сильноточные электрические контакты и токосъемники; элементы гидроприводов путевой техники; направляющие втулки и седла клапанов ДВС; фильтры и др. [1, 2].

На рисунке 1 представлена схема типового технологического процесса ПМ [3].

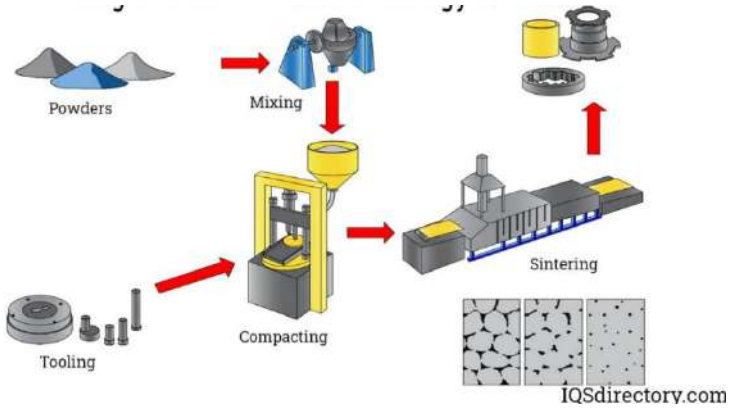


Рисунок 1 – Схема типового технологического процесса ПМ [3]

Как видно из рисунка 1, технология ПМ представляет три основных последовательных энергозатратных перехода: смешивание порошков основного компонента с легирующими добавками и технологической смазкой; прессование – придание в пресс-форме полученной смеси геометрии и размеров детали, плотности, приближенных к конечным; спекание – нагрев до температуры ниже температуры плавления с выдержкой для формирования требуемой микроструктуры, обеспечения теоретической плотности и прочности.

На рисунке 2 представлено сравнение технико-экономических параметров технологии ПМ с традиционными процессами, применяемыми в машиностроительном производстве [1].



Рисунок 2 – Место ПМ среди других промышленных технологий [1]

Как видно из рисунке 2, построенного по данным авторов и публикациям Европейской ассоциации ПМ (EPMA), технологии ПМ затрачивают энергии на одно изделие или на 1 кг в 2,2–2,8 раза меньше, чем при механической обработке резанием, а коэффициент использования материала – в 1,9–2,4 выше. Близкие к ПМ показатели имеет точное литье. Но при литье ограничен состав литейного сплава, следовательно, и уровень достижимых механических свойств конечного продукта.

Из трех стадий производства ПМ смешивание наименее затратно. Резервы энергосбережения на этой стадии невелики. При прессовании этот фактор более значимый – энергия расходуется не только на привод и рабочее движение деталей пресс-формы (пуансоны, матрица, стержень), но и на их вспомогательные движения (отвод) от пневмопривода, который может быть от индивидуального компрессора либо от стационарной пневмосети производства, что в ряде случаев может быть избыточно энергозатратным.

Прессование – ключевой этап формообразования в ПМ, при котором дисперсный порошок уплотняется в прочную заготовку (брикет или прессовку). Оно обеспечивает сыпучему материалу

заданную геометрическую форму и начальную прочность, необходимую для последующего спекания. Процесс заключается в следующем: порошок засыпается в пресс-форму и сжимается пуансонами под высоким давлением, величина которого определяется заданной плотностью прессовки. Частицы порошка при прессовании сближаются, их оксидные пленки разрушаются, а сами они пластически деформируются, создавая прочные механические и физические связи. На выходе получают заготовки, которые можно без разрушения или осыпаний извлечь из формы и подвергнуть далее термической обработке – спеканию.

От качества прессования зависят плотность, пористость и окончательные механические свойства готового изделия. Для этого используют пресс с высоким усилием, необходимым для преодоления сил межчастичного трения и трения частиц порошка о стенки матрицы и пуансонов, которое, в некоторой степени, снижается использованием специальных смазок: стеарата цинка, лития или кальция; синтетического воска; стеариновой кислоты, парафина и т. п. [1]. Для решения задачи энергосбережения при прессовании, повышения плотности прессовки при меньшей величине давления фирмами Höganäs AB (Швеция) и DORST (Германия) была разработана технология теплого прессования порошковых сталей [4, 5]. Сущность процесса теплого прессования состоит в использовании готовой смеси порошков низколегированных сталей и полимерных пластификаторов, легко удаляемых либо растворяемых в металле в процессе спекания, которые одновременно служат жидкой смазкой, уменьшающей трение между частицами порошка друг с другом и со стенками пресс-формы при температурах 120–140 °С. Использование процесса теплого прессования позволяет достичь на стадии формования изделий из легированных порошков железа значений плотности спеченных образцов 7,4–7,6 г/см^3 и сырой прочности прессовок, в 2 раза превышающей прочность прессовок, полученных по традиционной технологии (однократное прессование порошка при комнатных температурах и спекание обеспечивает плотность максимум 7,0–7,2 г/см^3). Применение процесса теплого прессования позволяет снизить давление прессования и исключить операции повторного прессования деталей после спекания или другие, еще более энергоемкие процессы, такие как холодная или горячая штамповка.

Спекание – наиболее энергозатратная стадия ПМ. Авторами [6] установлено, что для предприятий промышленного комплекса одним из узких мест в энергопотреблении являются нагревательные и термические печи. Среди рекомендуемых ими методов снижения энергопотребления – снижение потерь теплоты через ограждения печи и на аккумуляцию теплоты кладкой позволяет повысить КПД на 6–8 % и сэкономить 25–40 % и более топлива, снижение потерь тепла на входе и выходе конвейерных печей, устройство автоматических шлюзов на входе и выходе, снижение времени и температуры. В работе [7] высказана и теоретически обоснована идея реализации в целях энергосбережения связанных процессов: процессов непрерывного и дискретного изменения потоков энергии и материалов без их разрыва.

Для снижения расхода защитного газа, уменьшения потребления электроэнергии фирмой Mahler предложена эффективная схема печи, в которой зоны нагрева и охлаждения имеют уклоны в 10–15° (на подъем – в зоне нагрева, на спуск – в зоне охлаждения), что обеспечивает расположение зоны выжигания связки и зоны спекания выше верхнего края загрузочного и выгрузного проемов, подпор защитного газа в указанных двух зонах и снижение его потерь (рисунок 3).

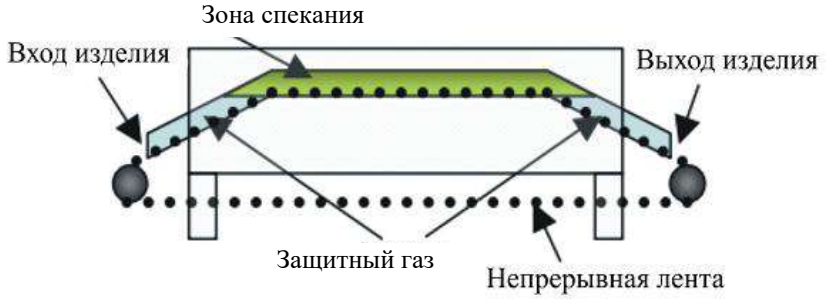


Рисунок 3 – Схема конвейерной печи с подпором защитной атмосферы в зоне спекания

Весьма перспективный и экономически выгодный процесс получения изделий из низколегированных сталей, подвергаемых термообработке [8–10]. С этой целью используют новый тип печей для спекания – закалки (sinter-hardening), в которых спекание может осуществляться в регулируемой углеродсодержащей среде (например, эндотермическом газе), а закалка – проводиться в зоне быстрого охлаждения с температурой 900 °С (рисунок 4)

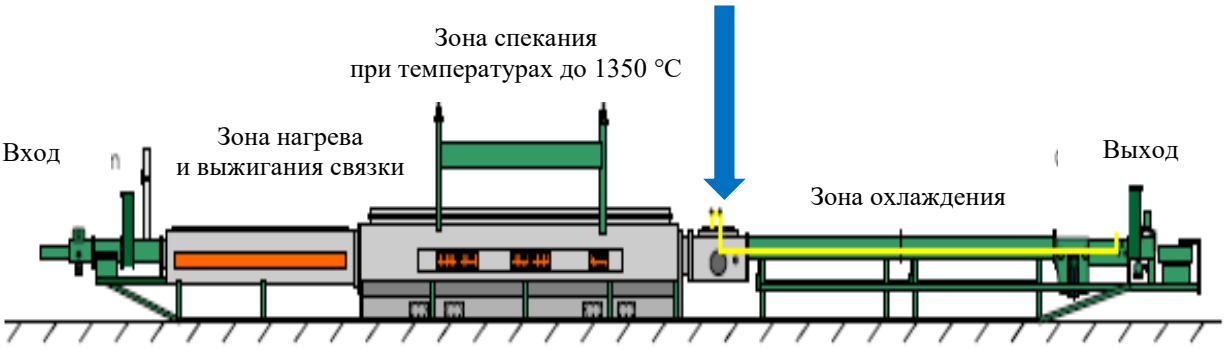


Рисунок 4 – Печь для спекания, совмещенного с газовой закалкой (sinter-hardening),
прессовок из высокопрочных порошковых сталей. Стрелка – подвод охлаждающего газа – азота или эндогаза

Совмещенный процесс спекания и закалки позволяет отказаться от дополнительного нагрева порошковых спеченных заготовок и использовать имеющуюся температуру на выходе из зоны спекания.

Безусловно, эффективным приемом повышения энергоэффективности печного оборудования является его модернизация. На рисунке 5 представлен пример такой модернизации колпаковой печи.

а) *б)*

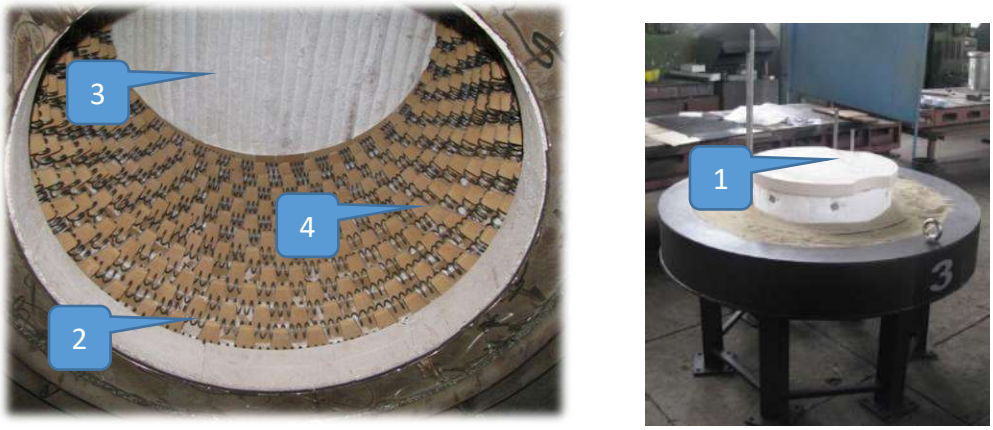


Рисунок 5 – Колпаковая печь:
а – вид нагревательного колпака изнутри;
б – стол спекания с подовой плитой из жаропрочного бетона (позиции расшифрованы далее в тексте)

В результате модернизации были выполнены следующие работы.

1 Применение двух раздельных зон нагрева по высоте печи.

2 Использование в конструкции печи элементов из низкотеплопроводного и малоинерционного жаропрочного бетона взамен чугунных элементов конструкции, в частности пода (1).

3Применение комбинированной футеровки (тепловая изоляция из легковесных волокнистых высокотемпературных материалов, крепление нагревателей с помощью шамотных фасонных элементов (2)).

4 Изготовление свода колпака печи из волокнистых материалов (3).

5 Изготовление нагревателей из современных сплавов сопротивления Kanthal A-1 (4).

6 Разработка и изготовление автоматизированной системы управления на современной элементной базе.

7 Применение автоматизированной системы дожига отработанных газов с автоматическим контролем пламени.

В результате удалось снизить на 24–26 % удельное энергопотребление при спекании, на 10–12 % – расход защитного газа (эндогаз, диссоциированный аммиак).

Таким образом, порошковая металлургия как промышленная технология, обладая ресурсо- и энергосберегающим эффектом, имеет резервы и возможности для снижения энергопотребления при выпуске больших партий спеченных деталей и заготовок.

Список литературы

1 **Савич, В. В.** Порошковая металлургия: современное состояние и перспективы развития / В. В. Савич, С. А. Оглезнева. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2021. – 695 с.

2 Исследование влияния добавок ультрадисперсного порошка системы $NiAl/Al_2O_3$ на триботехнические свойства фрикционного материала на основе меди / А. Ф. Ильющенко, Т. Л. Талако, А. В. Лешок [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 1. – С. 113–121.

3 Introduction to Press & Sinter Technology // Epma Publications. – URL: https://www.publications.epma.com/ product/introduction-to-press-sinter/ (date of access: 11.09.2026).

4 **Veltlt, G.** New Developments in Warm Compaction / G. Veltlt, F. Petzoldt // Proceedings of the 1997 : European Conference on Advances in Structural PM Component Production. – Munich : EPMA, 1997. – P. 36–43.

5 **Горохов, В. М.** Установка для теплого прессования металлических порошков – первый опыт применения для получения изделий сложной формы / В. М. Горохов, А. Ф. Ильющенко, П. Н. Киреев // Новые материалы и изделия из металлических порошков. Технология. Производство. Применение (ТПП-ПМ2005) : сб. тр. науч.-практ. семинара, г. Йошкар-Ола, 21–24 июня 2005 г. / редкол. В. А. Довыденков (отв. ред.) [и др.]. – Йошкар-Ола, 2005. – С. 41–44.

6 **Тимошпольский, В. И.** Энергосбережение в промышленных технологиях металлургического и машиностроительного производств / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова // Литье и металлургия. – 2011. – № 1 (59). – С. 119–123.

7 Модель энергосбережения для связанных процессов металлургии стали / В. Ванг, Ш. Ли, В. Ху [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2024. – № 67 (3). – С. 270–282.

8 **Larsson, C.** High performance sinter-hardening materials for synchronizing hubs / C. Larsson, U. Engström // Powder Metallurgy. – 2012. – Vol. 55, № 2. – P. 88–91.

9 **Голякова, И. Г.** Опыт применения печи с шагающим подом WBSX-40-125/E для упрочнения порошковых низколегированных сталей в потоке холодного эндогаза / И. Г. Голякова, В. М. Горохов, И. Н. Тарусов // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 12–14 сент. 2012 г.) / редкол.: П. А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2012. – С. 36–37.

10 **Горохов, В. М.** Применение технологии спекания, совмещенного с закалкой – эффективный путь повышения конкурентноспособности конструкционных деталей / В. М. Горохов, А. Ф. Ильющенко, И. Н. Тарусов // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сб. докл. 9-го Междунар. симпозиума (Минск, 8–10 апр. 2015 г.) : в 2 ч. Ч. 1. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2015. – С. 72–75.

УДК 621.762.4

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ПОРИСТЫЕ ПРОНИЦАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ВВЕДЕНИЯ МЕЛКИХ ПОРОШКОВ В ПОРИСТУЮ ЗАГОТОВКУ ИЗ КИПЯЩЕГО СЛОЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИБРАЦИИ

А. А. САТТАРОВ

Андижанский государственный технический институт, Республика Узбекистан

Технологический процесс введения мелких порошков в поровые каналы заготовки из кипящего слоя с приложением вибрации следующий: выбор порошка; рассев порошка; изготовление заготовки из крупного порошка; подбор мелких порошков для введения в поровые каналы заготовки; процесс введения из кипящего слоя с применением вибрации; окончательное спекание; контроль эксплуатационных свойств экологически чистых пористых проницаемых материалов (ППМ).

На рисунке 1 представлена зависимость массы вводимых мелких порошков от чистоты вибрации.

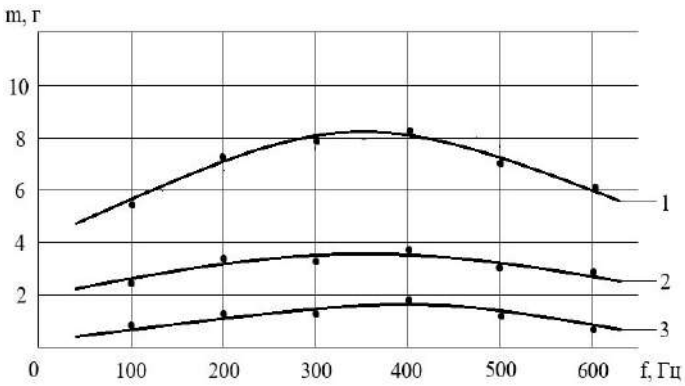


Рисунок 1 – Зависимость массы вводимых мелких порошков от частоты вибрации:
1 – (+200–250) мкм; *2* – (+100–125) мкм; *3* – (+50–63) мкм; a = 9,8 м/с^2; f = 350 Гц; P = 115–120 мм вод. ст.

Сравнение эксплуатационных характеристик ППМ из бронзы марки БрОФ-10-1, полученных методом введения мелких порошков в поровые каналы заготовки из кипящего слоя без применения и с применением вибрации представлено в таблице 1.

Таблица 1 – **Сравнение эксплуатационных характеристик ППМ из бронзы, полученных введением порошков из псевдоожиженного слоя без применения и с применением вибрации**

Методы получения ППМ	Материал и размер порошка, мм	Пористость П, %	Средний размер пор, мкм	Коэффициент проницаемости $K = 1 \cdot 10^{-13}$, м^2	Предел прочности при изгибе $Б_{изг}$, МПа	Параметр эффективности E_1	Распределение локальной проницаемости $K_л$	Тонкость очистки
Осаждение частиц из псевдоожиженного слоя	БрОф-10-1 0,8–1,0* 0,2–0,25** 0,1–0,125** 0,05–0,063**	38	20	170	100–120	0,140	0,6	8–12
Введение мелких порошков из кипящего слоя с применением вибрации	БрОф-10-1 0,8–1,0* 0,2–0,25** 0,1–0,125** 0,05–0,063**	36	20	176	125–135	0,141	0,98	3–5

*Исходное сырье (заготовка).
**Осаждаемый порошок.

Из таблицы 1 видно, что эксплуатационные свойства ППМ, полученные методом введения мелких порошков в поровые каналы заготовки из кипящего слоя с применением вибрации, выше, чем без применения вибрации и обеспечивают глубокую степень очистки жидкости и газов и равномерную локальную проницаемость.

Анализ проведенных исследований показал, что введение мелких порошков в поровые каналы заготовки при наложении определенных параметров вибрации позволяет увеличить параметр эффективности и механическую прочность ППМ на 50 %, тонкость очистки на 15–20 % и тем самым обеспечивает глубокую очистку жидкостей и газов. В этой статье была разработана усовершенствованная технология получения ППМ, основанная на введении мелких порошков в поровые каналы заготовки из кипящего слоя с приложением вибрации за один цикл.

Список литературы

1 **Витязь, П. А.** Классификация и пути получения спеченных проницаемых материалов с улучшенным комплексом свойств / П. А. Витязь // Прогрессивные технологические процессы в порошковой металлургии. – 1982. – С. 107–114.

2 **Каршиев, М.** Изготовление пористых порошковых изделий из бронзы методом осаждения из псевдоожиженного слоя / М. Каршиев, А. А. Саттаров // Композиционные материалы. – 2023. – № 2. – С. 257–259.

УДК 678.5:534.8.081.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВЕРШИННЫХ ТОЧЕК

А. С. ТУЛЕЙКО, С. Н. БУХАРОВ, В. В. КОЖУШКО, Е. Ф. КУДИНА
Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель

В связи с развитием транспортной инфраструктуры все более важной экологической проблемой из-за негативного воздействия на здоровье человека является шумовое загрязнение. Одним из решений для борьбы со средне- и высокочастотным шумом от транспортных систем на прилегающих территориях является применение придорожных шумовых барьеров [1].

Главными элементами при разработке шумовых барьеров служат звукопоглощающие слоистые шумопонижающие конструкции. При этом ключевой задачей является создание композитов, сочетающих в себе малый вес, повышенную прочность и экологичность [2]. Согласно профильной нормативной документации, звукопоглощающие слои шумозащитных сэндвич-конструкций в шумовых барьерах должны выполняться из гидрофобизированного минераловатного наполнителя высокой плотности или его аналогов, ключевыми недостатками которых являются ограниченный ресурс

материала в условиях атмосферных воздействий, ухудшение акустических характеристик при намокании, морозная деструкция, а также эмиссия волокон в окружающую среду [3].

В рамках настоящей работы предложено решение задачи экспериментальной оптимизации акустических характеристик композитов, применяемых в составе шумовых барьеров. Композиты изготавливали из отходов сельскохозяйственных производств, содержащих в качестве основного (по объемному содержанию) натурального компонента рисовую (RH) и гречневую (BH) шелуху, в качестве связующего полимера эпоксидную смолу, модифицированную углеродными и пластифицирующими добавками (ER). Благодаря своему составу, такой композит обладает низким влагопоглощением и сохраняет свои акустические свойства при длительной эксплуатации.

Для планирования эксперимента по оптимизации трехкомпонентных акустических композитов был использован метод экстремальных вершинных точек (extreme vertices design). Данный метод применяется в задачах исследования смесей, когда компоненты в сумме дают 100 %, но есть ограничения на их доли. В этом случае область поиска представляет собой ограниченный симплекс, и эксперименты планируются именно в его вершинах для построения точной математической модели [4, 5]. На основе этого математического метода составлена матрица планирования эксперимента (таблица 1) и изготовлены 10 экспериментальных образцов диаметром 100 мм и толщиной 10 мм.

Таблица 1 – **Матрица планирования эксперимента, результаты измерений и оптимизации**

№ образца	Содержание компонента, мас.%			Коэффициент звукопоглощения *f*(α) 1000 Гц	Показатель звукоизоляции, дБ *f*(TL) 1000 Гц
	A(ER)	B(BH)	C(RH)		
1	15	0	85	0,066	1,10
2	100	0	0	0,032	36,00
3	15	85	0	0,056	1,53
4	15	42,5	42,5	0,066	1,40
5	57,5	0	42,5	0,060	2,32
6	57,5	42,5	0	0,045	2,02
7	43,33	28,33	28,33	0,063	1,68
8	29,17	14,17	56,67	0,069	1,52
9	71,67	14,17	14,17	0,044	4,32
10	29,17	56,67	14,17	0,062	1,22
11*	*59,50*	*7,27*	*33,23*	*0,056*	*6,02*
*Состав композита, найденный по решению оптимизационной задачи.					

Проведены испытания по определению основных акустических характеристик экспериментальных образцов в диапазоне частот 200–1600 Гц. Измерение нормального коэффициента звукопоглощения выполнено стандартным методом ISO 10534-2, измерение показателя звукоизоляции – методом ASTM E2611-19.

На основе экспериментальных данных, полученных по результатам акустических испытаний, включая результаты измерений коэффициента звукопоглощения и показателя звукоизоляции на частоте 1000 Гц, получены регрессионные уравнения, описывающие модели аппроксимации данных к поверхностям отклика коэффициента звукопоглощения и показателя звукоизоляции. Графическая интерпретация моделей трехкомпонентных смесей в виде контурных диаграмм наглядно демонстрирует влияние состава на исследуемые характеристики композитов (рисунок 1). Результатом оптимизации является состав композита (строка 11 таблицы 1), обеспечивающего приемлемый баланс акустических характеристик.

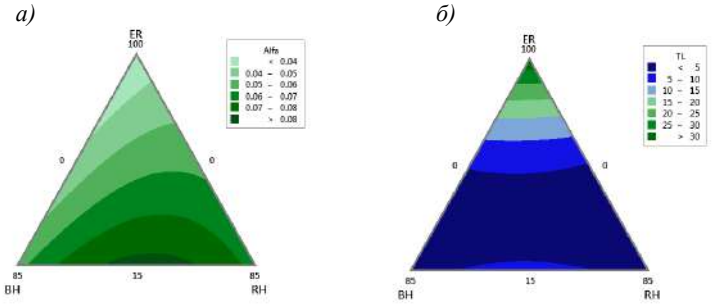


Рисунок 1 – Контурные диаграммы тройных систем
по результатам аппроксимации коэффициента звукопоглощения (*а*) и показателя звукоизоляции (*б*)

Таким образом, применение метода экстремальных вершинных точек позволило сократить объем экспериментов, необходимых для оптимизации содержания компонентов в разрабатываемых композитах по критериям максимального звукопоглощения и звукоизоляции. Полученные результаты экспериментальных исследований по определению нормального коэффициента звукопоглощения и показателя изоляции воздушного шума показывают, что разработанные композиты на основе отходов сельскохозяйственных производств могут рассматриваться в качестве перспективных экологичных акустических материалов для применения в придорожных шумовых барьерах.

Работа выполнена в рамках мероприятия задачи 3 подпрограммы 4 Государственной программы «Наука для экономики и общества», договор № 2026-26-224.

Список литературы

1 Акустические композиты и шумопонижающие конструкции. Часть I: Экологические безопасные компоненты и нанонаполнители (Обзор) / С. Н. Бухаров, В. П. Сергиенко, В. В. Кожушко [и др.] // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – Т. 7, № 1. – С. 6–22.

2 **Marques, B.** Rice husk cement-based composites for acoustic barriers and thermal insulating layers / B. Marques, J. Almeida, A. Tadeu [et al.] // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 39. – C. 102297.

3 **Давыдов, Д. Д.** Анализ способов изготовления звукопоглощающих конструкций / Д. Д. Давыдов // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2024. – Т. 16, № 6. – С. 39–47.

4 **Montgomery, D. C.** Design and analysis of experiments / D. C. Montgomery. – 8th ed. – New York : John Wiley & Sons, 2012. – 730 p.

5 **Snee, R. D.** Extreme vertices designs for linear mixture models / R. D. Snee, D. W. Marquardt // Technometrics. – 1974. – Vol. 16, № 13. – P. 399–408.

УДК 504.5:656.2

УДЕЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

А. Э. ЮНИЦКИЙ, С. В. АРТЮШЕВСКИЙ
ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Республика Беларусь

Оценку воздействия транспорта на климат классически связывают только с выбросами углекислого газа (CO_2). При этом современные ученые-климатологи и международные нормативные документы обозначают необходимость учитывать все парниковые газы, образующиеся при работе транспортных систем.

Транспортные средства с ДВС (включая тепловозы и автомобили) при работе выделяют с CO_2:

– метан (CH_4) – образуется из-за неполного сгорания топлива; его потенциал глобального потепления (GWP) в 25–30 раз выше, чем у CO_2;

– закись азота (N_2O) – образуется в каталитических нейтрализаторах и при высокотемпературном сгорании; её GWP в 265–298 раз выше, чем у CO_2.

Пренебрежение CH_4 и N_2O приводит к неправильной оценке фактического воздействия на климат от автомобильного транспорта по сравнению с электрическим (метро, троллейбус, электропоезд, струнный транспорт [1]).

При этом международный стандарт ISO 14083:2023 «Greenhouse gases – Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations» обязывает учитывать не только выхлопные газы, получившиеся при сжигании в ДВС (путь «от бака до колеса» − Tank-to-Wheel, TtW), но и эмиссии при производстве и доставке топлива/энергоносителя (путь «от скважины до бака» − Well-to-Tank, WtT). Это критически важно для полного комплексного сравнения:

– для классического автомобиля с ДВС WtT включает выбросы при добыче нефти, её транспортировке и переработке в бензин/дизель;

– для электрокара/струнного юнимобиля WtT включает выбросы при получении электроэнергии на ТЭС, что крайне важно для стран с высокой долей угольной энергетики (в России – от 310 до 634 г CO_2-экв./(кВт·ч)).

Таким образом, только полный путь «от скважины до колеса» – Well-to-Wheel (WtW) в CO_2-эквиваленте предоставляет научно корректные показатели для сравнения транспортных систем с разными типами энергоносителей и двигателей.

Расчёт выполнен по методологии ISO 14083:2023 и основан на двух главных этапах:

1 Well-to-Tank – выбросы при производстве, переработке и доставке топлива/энергии.

2 Tank-to-Wheel – выбросы при эксплуатации транспорта (выхлопная труба).

Общий показатель Well-to-Wheel, г CO_2e/(пас·км), представляет собой сумму этих двух компонентов:

$$E_{WtW} = E_{WtT}^{\text{уд}} + E_{TtW}^{\text{уд}}, \quad (1)$$

где $E_{WtT}^{\text{уд}}$ – удельные выбросы на этапе Well-to-Tank, г CO_2e/(пас·км);

$E_{TtW}^{\text{уд}}$ – удельные выбросы на этапе Tank-to-Wheel, г CO_2e/(пас·км).

Целевая функция: $E_{WtW} \rightarrow \min$.

Для приведения различных парниковых газов к общему показателю используют коэффициенты потенциала глобального потепления (GWP) за 100-летний горизонт. Коэффициенты представлены в таблице 1 согласно актуальным данным IPCC AR6 [2].

Таблица 1 – **Коэффициенты потенциала глобального потепления (GWP) за 100-летний горизонт**

Газ	Химическая формула	GWP_{100} (AR6)	Примечание
Углекислый газ	CO_2	1	Базовый уровень
Метан	CH_4	25	Образуется при неполном сгорании
Закись азота	N_2O	298	Образуется в катализаторах

Выбросы в CO_2-эквиваленте:

$$CO_2e = m_{CO_2} \cdot 1 + m_{CH_4} GWP_{CH_4} + m_{N_2O} \cdot GWP_{N_2O}, \quad (2)$$

где m – масса выброса соответствующего газа.

Эмиссионные факторы EF, г/кг топлива, для основных видов топлива представлены в таблице 2.

Таблица 2 – **Эмиссионные факторы *EF* для основных видов топлива**

Топливо	EF_{CO_2}	EF_{CH_4}	EF_{N_2O}
Бензин (автомобильный) [3]	3180	0,8	0,06
Дизельное топливо [3]	3140	0,08	0,2
Сжиженный нефтяной газ (пропан-бутан) [3]	3000	0,6	0,5
Сжатый природный газ [3]	2750	14,5	0,6
Биодизель [4]	2800	0,4	0,8
Метанол [3]	1632	0,2	0,5

Это обозначает, что при сжигании 1 кг топлива мы получим выбросы газов следующей массой:
– бензина: CO_2 – 3180 г, CH_4 – 0,8 г, N_2O – 0,06 г;
– дизельного топлива: CO_2 – 3140 г, CH_4 – 0,08 г, N_2O – 0,2 г.

Для бензина –

$$CO_2e_б = 3180 \cdot 1 + 0{,}8 \cdot 25 + 0{,}06 \cdot 298 = 3218; \quad (3)$$

для дизельного топлива –

$$CO_2e_д = 3140 \cdot 1 + 0{,}08 \cdot 25 + 0{,}2 \cdot 298 = 3202. \quad (4)$$

Компонент $E_{TtW}^{\text{уд}}$ (эксплуатационные выбросы) для транспортных средств с ДВС (автомобиль, автобус, тепловоз)

$$E_{TTW}^{\text{уд}} = \frac{Q_{\text{топ}} \rho_{\text{топ}} (EF_{CO_2} + EF_{CH_4} GWP_{CH_4} + EF_{N_2O} GWP_{N_2O})}{n_{\text{пас}} \cdot 100}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{топ}}$ – расход топлива на 100 км, л/100 км; $\rho_{\text{топ}}$ – плотность топлива (0,74/0,85 кг/л для бензина/дизеля); $EF_{\text{газ}}$– эмиссионный фактор соответствующего газа, г/кг топлива; $n_{\text{пас}}$ – среднее число пассажиров, чел.

Для автомобиля пассажировместимостью 5 человек и средним расходом топлива 8 л / 100 км получим:

$$E_{TTW_{\text{б}}}^{\text{уд}} = \frac{8 \cdot 0{,}74 \cdot (3180 + 0{,}8 \cdot 25 + 0{,}06 \cdot 298)}{5 \cdot 100} = 38{,}1 \text{ г } CO_2e/\text{пас·км}, \quad (6)$$

$$E_{TTW_{\text{д}}}^{\text{уд}} = \frac{8 \cdot 0{,}85 \cdot (3140 + 0{,}08 \cdot 25 + 0{,}2 \cdot 298)}{5 \cdot 100} = 43{,}5 \text{ г } CO_2e/\text{пас·км}; \quad (7)$$

Для электрического транспорта (струнные электромобили, электропоезда, метро, трамваи, троллейбусы, электромобили)

$$E_{TtW}^{\text{уд}} = 0. \quad (8)$$

Согласно стандарту ISO 14083:2023, электромобили и электропоезда не имеют выхлопных выбросов при эксплуатации. Весь углеродный след в таких системах формируется в период компонента $E_{WtT}^{\text{уд}}$.

Компонент $E_{WtT}^{\text{уд}}$ (выбросы при производстве энергии) для жидкого топлива (бензин, дизель, газ)

$$E_{WtT}^{\text{уд}} = \frac{Q_{\text{топ}}\rho_{\text{топ}}(EF_{WtT,\text{ добыча}} + EF_{WtT,\text{ переработка}} + EF_{WtT,\text{ транспорт}})}{n_{\text{пас}} \cdot 100} \quad (9)$$

или упрощённо через коэффициент доли WtT

$$E_{WtT}^{\text{уд}} = E_{TtW}^{\text{уд}} k_{WtT}. \quad (10)$$

По данным исследований, проведённых для европейского региона [5], доля WtT для бензинового двигателя составляет 13,1 % от общего WtW количества выбросов эквивалента CO_2, или 15 % от TtW. Для дизельного топлива он составляет 8,7 % от общего WtW количества выбросов эквивалента CO_2, или 9,5 % от TtW. Таким образом, получаем следующие коэффициенты:

– для бензина: $k_{WtT} \approx 0{,}15$;

– для дизеля: $k_{WtT} \approx 0{,}095$.

Значения общего показателя WtW в CO_2-эквиваленте:

$$E_{WtW_{\text{б}}} = E_{TtW_{\text{б}}}^{\text{уд}} \cdot 1{,}15 = 38{,}1 \cdot 1{,}15 = 43{,}8 \text{ г } CO_2e/\text{пас·км}; \quad (11)$$

$$E_{WtW_{\text{д}}} = E_{TtW_{\text{д}}}^{\text{уд}} \cdot 1{,}095 = 43{,}5 \cdot 1{,}095 = 47{,}6 \text{ г } CO_2e/\text{пас·км}; \quad (12)$$

Список литературы

1 **Юницкий, А. Э.** Транспортно-инфраструктурные комплексы Юницкого как комплексное решение транспортных проблем в области энергоэффективности, экологичности и безопасности / А. Э. Юницкий, С. В. Артюшевский // Транспорт России: проблемы и перспективы : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 9–10 нояб. 2022 г., г. Санкт-Петербург. – СПб. : ИПТ РАН, 2022. – С. 139.

2 Well-To-Tank Report Version 4.0: JEC Well-To-Wheels Analysis / R. Edwards, J.-F. Larivé, D. Rickeard, W. Weindorf. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2014. – 146 p.

3 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories // Intergovernmental Panel on Climate Change. – URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/ch1ref5.pdf (date of access: 11.09.2026).

4 Emission factors of biodiesel combustion in industrial boiler: A comparison to fossil fuel / L. N. Komariah, S. A. Rachman, N. Novia [et al.] // Journal of Renewable and Sustainable Energy. – 2013. – Vol. 5, № 5. – URL: https://www.researchgate.net/publication/278400395_Emission_factors_of_biodiesel_combustion_in_industrial_boiler_A_comparison_to_fossil_fuel (date of access: 11.09.2026).

5 **Prieur, A.** A detailed Well to Wheel Analysis of CNG compared to diesel oil and gasoline for the French and the European markets / A. Prieur, R. A. Tilagone // Fuels & Emissions Conference. – 2007. – URL: https://www.researchgate.net/ publication/300822762_A_Detailed_Well_to_Wheel_Analysis_of_CNG_Compared_to_Diesel_Oil_and_Gasoline_for_the_French_ and_the_European_ Markets (date of access: 11.09.2026).

5 БЕЗОПАСНОСТЬ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

УДК 625.855.52:691.16

КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ ХОЛОДНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

Ю. Г. АЛЕКСЕЕВ, ЛЮ ТИНГОУ, ЛИ ЧЖУНЬЮЙ, ЦИН ЧЖАН, ЧАНФЭН ХАО, ДЕХУА ХОУ
Компания «Гаоюань» по технологии обслуживания автомагистралей, г. Синсянь, Китайская Народная Республика

Современные условия эксплуатации автомобильных дорог характеризуются ростом интенсивности движения и повышением осевых нагрузок. Традиционные асфальтобетонные покрытия подвержены колееобразованию и термическим трещинам уже в первые годы службы, а методы горячего ремонта требуют значительных энергозатрат и длительного перекрытия движения. В связи с этим приоритетным направлением становится холодная регенерация, позволяющая перерабатывать старый асфальтобетон непосредственно на месте без термической активации [1, 2]. Перспективным решением являются композитные материалы МОН (Multiplex Organic Hydraulicity materials), разработанные компанией «Гаоюань» (г. Синсянь, КНР), представляющие собой гибридные органо-гидравлические системы на основе битумной эмульсии и неорганических вяжущих.

Технология МОН предполагает создание композитного материала, в котором органическая составляющая (битумная эмульсия) обеспечивает гибкость, водонепроницаемость и трещиностойкость, а неорганическая (портландцемент) придает прочность, жесткость и сдвигоустойчивость. При фрезеровании старого покрытия происходит частичная деструкция окисленных битумных пленок на поверхности зерен асфальтогранулята, однако при холодном смешении без термической активации старый битум сохраняет повышенную вязкость и сниженную адгезионную активность, что обусловливает необходимость применения активных вяжущих, способных формировать прочные кристаллизационные связи. Ключевыми достоинствами МОН являются работа при нормальной температуре, сокращение энергопотребления, быстрый набор прочности и возможность устройства слоев толщиной от 5 до 80 мм.

Практическая апробация технологии МОН в Китае (рисунок 1) подтвердила ее высокую эффективность. Национальный инженерный центр дорожно-строительного оборудования совместно с дорожными службами провинции Цзянсу реализовал проекты холодной высокомодульной модификации покрытий на участках с интенсивным движением и глубокой колейностью. МОН-материалы позволили значительно повысить несущую способность и сдвигоустойчивость дорожной одежды при сокращении временных сроков закрытия движения.



Рисунок 1 – Устройство покрытия из Multiplex Organic Hydraulicity materials

Технология уже разработана, но эксперименты по ее совершенствованию продолжаются в рамках совместных белорусско-китайских исследований (National Key R&D Program of China № 2025YFE0199500 и Outstanding Foreign Scientists Studio Foundation of Henan № GZS2026001), изучены закономерности формирования структурно-механических свойств холоднорегенерированных органоминеральных композитов при различных способах введения вяжущего [3, 4].

Проведен сравнительный анализ [3] традиционной технологии с введением сухого портландцемента (1,0–4,0 %) и модификации смесями предварительно подготовленными дисперсными цементно-песчаными системами (суспензиями) в диапазоне 5–30 % от массы асфальтогранулята. Установлено, что суспензионный способ обеспечивает формирование пространственно-непрерывной микрорастворной матрицы, качественно отличающейся от дискретных точечных кристаллизационных контактов «сухого» способа. При «сухом» введении цемента гидратация протекает неравномерно, и при дозировках свыше 2,5 % образуются хрупкие кластеры, инициирующие микротрещины. Для суспензионных составов зафиксирован устойчивый линейный рост структурной прочности без эффекта «срыва» при высоких дозировках, достигающий 3,32 МПа. Несущая способность при 50 °С возрастает до 6,36 МПа, что превосходит прочность традиционных смесей при 20 °С. Индекс релаксации для суспензионных систем стабильно превышает 2,1, что на 15–20 % выше показателей эталонных смесей, подтверждая повышенную трещиностойкость.

Параллельно исследовано влияние параметров дисперсной фазы и зернового каркаса на физико-механические свойства смесей с высоким содержанием асфальтогранулята [4]. Установлено, что частичная замена портландцемента активированным минеральным порошком (1 % цемента + 1 % порошка вместо 2 % цемента) повышает предел прочности на раскол на 8,5 % и удельную эффективность цемента более чем в два раза (с 0,67 до 1,46 МПа/%). Регрессионная модель выявила нелинейный характер зависимости модуля упругости от содержания наполнителя, точка структурного оптимума составляет около 3,32 %. Коэффициент деформативности показал, что смеси с комбинированной дисперсной фазой обладают наилучшим балансом прочности и способности к релаксации напряжений, а коэффициент каркасной стабильности достигает 1,91. Использование дисперсных минеральных компонентов, в том числе тонкодисперсных отходов промышленности [5, 6] или использование гибридного наполнителя на основе углеродных наноматериалов [7], является перспективным направлением повышения плотности структуры и морозостойкости композитных материалов.

Таким образом, технология холодной регенерации на основе композитных материалов МОН представляет собой эффективное и экологически безопасное решение для восстановления асфальтобетонных покрытий. Комплексный подход к проектированию составов, учитывающий оптимизацию дисперсной фазы и зернового каркаса, обеспечивает формирование материала с прогнозируемыми свойствами. Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование методов многокритериального проектирования и изучение кинетики совместного отверждения и работы битумной эмульсии и цемента с возможностью комплексной модификации свойств обоих вяжущих.

Список литературы

1 Recycling of Materials for Pavement Dressing: Analytical Review / Liu Tingguo, V. N. Zankavich, Yu. N. Aliakseyeu, B. M. Khroustalev // Science & Technique. – 2019. – Vol. 18, № 2. – P. 104–112. – DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-104-112.

2 Thermodynamic Aspects of Pavement Engineering / B. M. Khroustalev, T. Liu, Yu. G. Aliakseyeu [et al.] // Nauka i Tekhnika = Science & Technique. – 2022. – Vol. 21, № 1. – P. 28–35. – DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-1-28-35.

3 Regulation of structure formation in cold-recycled mixtures via optimization of the dispersed phase and aggregate skeleton / B. M. Khroustalev, A. A. Afanasenka, P. P. Yatsevich [et al.] // Vestnik of Brest State Technical University. – 2026. – № 1 (139). – P. 3–12. – DOI: 10.36773/1818-1112-2026-139-1-3-12.

4 Закономерности формирования структурно-механических свойств и температурной чувствительности органоминеральных композитов холодной регенерации при модификации дисперсными цементно-песчаными системами / Ю. Г. Алексеев, А. А. Афанасенко, П. П. Яцевич [и др.] // Автомобильные дороги и мосты. – 2026. – № 37. – С. 39–46.

5 Состав и свойства цементобетонных смесей для дорожного строительства с использованием тонкодисперсных отходов ТЭЦ / А. В. Корончик, Е. М. Жуковский, С. Е. Кравченко, О. В. Гайдук // Автомобильные дороги и мосты. – 2022. – № 1 (29). – С. 71–81.

6 **Корончик, А. В.** Влияние добавления тонкодисперсных отходов ТЭЦ на водопоглощение и морозостойкость бетонов для дорожного строительства / А. В. Корончик, Е. М. Жуковский, С. Е. Кравченко // Автомобильные дороги и мосты. – 2024. – № 2 (34). – С. 64–71.

7 Mechanoactivated hybrid nanomodifiers for increasing the operational reliability of asphalt concrete / S. A. Zhdanok, P. P. Samtsov, P. P. Yatsevich, A. A. Afanasenka // Journal of Materials and Engineering Structures «JMES». – 2026. – Vol. 13, № 4. – P. 651–666.

УДК 625.7

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ УЗЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНОЙ РАЗВЯЗКИ

Н. Ю. АЛИМОВА, В. В. МАКСИМОВИЧ
Воронежский государственный технический университет, Российская Федерация

Одноуровневые пересечения автомобильных дорог традиционно относятся к участкам с повышенным риском аварийности. Эффективным проектным решением в данном случае выступают кольцевые транспортные развязки, внедрение которых позволяет снизить общее число ДТП, а также минимизировать их тяжесть и количество летальных исходов. Подобный результат достигается за счет специфических планировочных и геометрических параметров кольца, которые вынуждают водителей снижать скорость как на подходах к узлу, так и непосредственно при его прохождении.

При разработке проекта строительства автомобильной дороги М-4 «Дон» – п. Отрадное – г. Воронеж (ул. Урывского) в Воронежской области на Т-образном примыкании улицы Урывского к улице Магистральной запроектирована кольцевая транспортная развязка. На ПК 0+00 запроектировано двухполосное кольцевое пересечение с улицей Магистральной. Цифровая модель развязки представлена на рисунке 1 [1]. Радиус внешней кромки составляет 50 м, радиус центрального островка 40 м. Ширина полосы движения по 2×4,7 м, между внешней кромкой проезжей части и бортовым камнем устраивается краевая полоса 0,6 м. Выбор данных радиусов обусловлен необходимостью обхода охранной зоны линии электропередач (ЛЭП) при трассировке полос, а также заложенной возможностью будущего расширения улицы Магистральной до четырех полос движения. Величина поперечного уклона составляет 20 ‰ для проезжей части и 13 ‰ для зеленой зоны центрального островка.

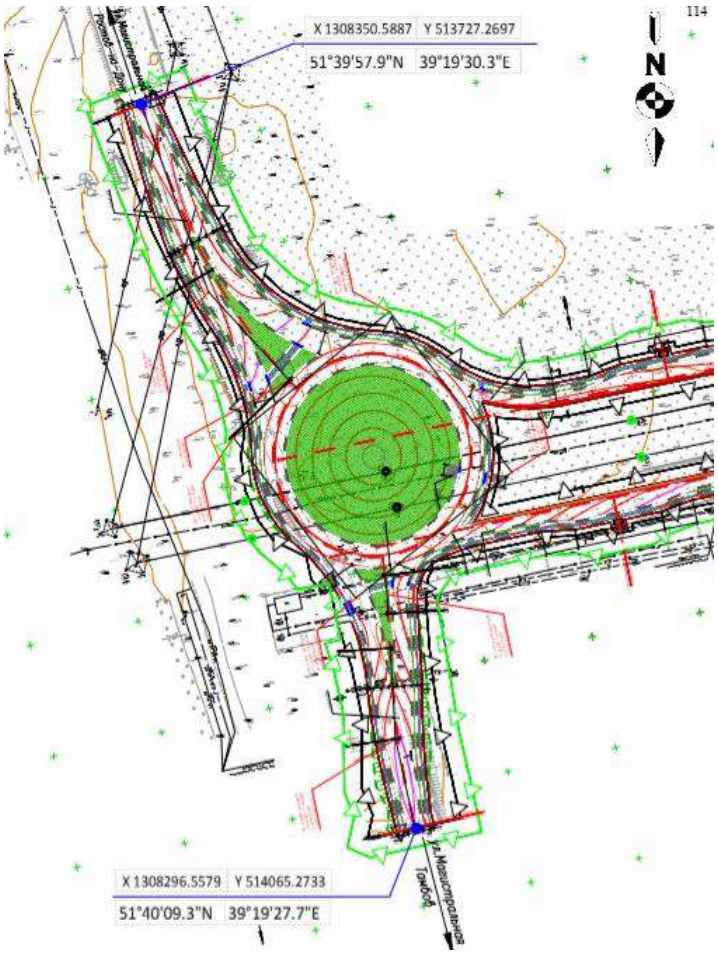


Рисунок 1 – Цифровая модель кольцевой развязки

Вертикальная планировка съездов и кольцевых пересечений выполнена с условием беспрепятственного сброса поверхностных вод в ливневую сеть. Конструктивные слои дорожной одежды на закруглениях съездов запроектированы аналогично основной проезжей части.

На рисунке 2 представлена схема распределения транспортных потоков на развязке с указанием среднесуточной интенсивности движения для каждого направления (в физических единицах).

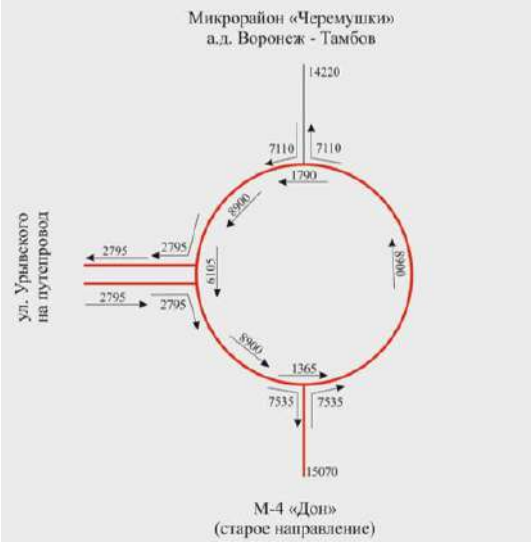


Рисунок 2 – Схема распределения транспортных потоков на кольцевой развязке

В ходе исследования был выполнен комплексный анализ безопасности дорожного движения на кольцевой развязке. Оценка уровня аварийности и рисков возникновения различных типов ДТП проводилась дифференцированно для характерных участков: на подъездах к развязке, а также на участках въезда транспортных средств и их выезда с развязки. Расчетный период прогнозирования показателей составил один год.

В качестве критерия аварийности принята частота возникновения ДТП на кольцевой развязке по сравнению со статистикой других видов дорожных происшествий [2].

Результаты оценки аварийной опасности на локальных участках транспортной развязки представлены в таблице 1. Анализ выполнен для участков на подходах к кольцевой развязке со стороны съездов A_1, при въезде на кольцевую проезжую часть A_2, при выезде с кольцевой проезжей части A_3.

Таблица 1 – **Показатели аварийности узловых элементов кольцевой транспортной развязки**

Направление съезда	Уровень аварийности		
	A_1	A_2	A_3
ЖК «Черемушки»	0,014	0,0203	0,42
ул. Урывского	0,005	0,0865	0,22
М-4 «Дон» старое направление	0,013	0,0371	0,44

На основе проведенного исследования установлено, что степень аварийной опасности в границах обособленных зон кольцевой развязки на трассе М-4 «Дон» – п. Отрадное – г. Воронеж (ул. Урывского) в Воронежской области находится в пределах безопасного диапазона. Это научно обосновывает проектное решение по организации кругового движения как эффективного метода обеспечения безопасности на данном примыкании.

Список литературы

1 **Гладышева, О. В.** Опыт применения программных средств CREDO III при разработке информационной модели транспортной развязки в городе Воронеж / О. В. Гладышева, Н. Ю. Алимова, Н. Ю. Мельников // Наука и инновации в строительстве : сб. докл. V Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. – Белгород, 2021. – С. 159–163.

2 ОДМ 218.2.071.2016 Методические рекомендации по проектированию кольцевых пересечений при строительстве и реконструкции автомобильных дорог / Федеральное дорожное агентство (РОСАВТОДОР). – М. : Изд-во ФГУП «Информавтодор», 2017. – 162 с.

УДК 625.7/.8.05

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

В. А. АЛМАБЕКОВ, Ю. Н. БЕЛЯВСКАЯ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Природа саморегенерации битумных материалов. Битум как вязкоупругий материал обладает ограниченной способностью к самозалечиванию. При смыкании берегов микротрещины за счет капиллярных сил и веса вышележащих слоев происходит взаимная диффузия молекул битума через поверхность контакта, что приводит к частичному восстановлению сплошности [1, 2]. Этот процесс интенсифицируется при повышенных температурах и практически прекращается при отрицательных, характерных для климатических условий Беларуси в зимний период. Инженерные методы самовосстановления направлены на искусственное создание благоприятных условий (нагрев) либо на введение в состав смеси дополнительных реагентов, компенсирующих потерю когезионных и адгезионных свойств вяжущего. Все известные технологии можно разделить на четыре группы: индукционный электромагнитный нагрев с использованием проводящих наполнителей; микрокапсулирование регенерирующих (омолаживающих) агентов; применение реактивных полимерных и инкапсулированных вяжущих добавок; биологические методы с использованием бактериальных культур и минералообразующих компонентов.

Технология индукционного подогрева с использованием токопроводящих присадок является наиболее изученным подходом в данной области. Согласно исследованиям [3, 4], в состав асфальтобетона вводятся стальные волокна (длина 2–8 мм), металлическая стружка или окалинка в пропорции 2–6 % от общего объема. Под воздействием переменного электромагнитного поля с частотой 50–100 кГц проводящие включения нагреваются благодаря вихревым токам, что приводит к локальному повышению температуры битумного вяжущего до 60–80 °С. Снижение вязкости позволяет материалу заполнить микротрещины, а после остывания прочность конструкции восстанавливается на 70–90 % от первоначального уровня [3]. Ремонтные работы выполняются мобильными индукционными комплексами со скоростью 2–4 км/ч без необходимости демонтажа покрытия [4]. Главными недостатками метода считаются потребность в специализированной технике и увеличение стоимости смеси на 10–15 %. Тем не менее, возможность многократного применения и высокий уровень восстановления делают эту технологию особенно эффективной для автомагистралей с высокой интенсивностью движения.

Применение микрокапсул с регенерирующими веществами. Данная технология подразумевает интеграцию в состав асфальтобетонной смеси микрокапсул из полимера или керамики (размером 50–200 мкм), внутри которых содержится маловязкое масло растительного или синтетического происхождения [5, 6]. Когда в материале образуется трещина, оболочка капсулы ломается, высвобождая содержимое. Это вещество разжижает битум, восполняет потерянные легкие фракции и способствует повторному сцеплению краев разрушения. Процесс запускается автоматически в момент повреждения, что является преимуществом перед методами с индукционным нагревом. Прочностные характеристики восстанавливаются на 40–60 % [5]. Главный недостаток – однократное использование капсулы в одном месте, поэтому требуется равномерное распределение большого их количества в объеме [6].

Модификация полимерами и биологические подходы. Добавление специальных полимеров (например, SBS-сополимеров или этиленвинилацетата) увеличивает эластичность битума и его способность упруго восстанавливать форму после снятия нагрузки, что косвенно способствует самозалечиванию [1, 2]. Прочность при этом восстанавливается на 30–50 %. Преимущество метода заключается в отсутствии необходимости в специальном оборудовании и совместимости с обычными асфальтобетонными заводами. Биологические технологии, использующие бактерии Bacillus для образования кальцитоподобных минералов, пока проходят лабораторные тесты [10]. При взаимодействии с водой и кислородом бактерии генерируют карбонат кальция, который частично заполняет мелкие трещины. Широкое применение этого способа ограничено высокой ценой, а также чувствительностью бактерий к температурным режимам укладки и агрессивному воздействию битума.

Сравнительный анализ эффективности. Сопоставление основных характеристик рассмотренных технологий приведено в таблице 1.

Таблица 1 – **Сравнительная оценка методов самовосстановления асфальтобетона**

Критерий	Индукционный нагрев	Микрокапсулирование	Полимерные добавки	Биологические методы
Восстановление прочности	Высокое (70–90 %)	Среднее (40–60 %)	Среднее (30–50 %)	Низкое–среднее (20–40 %)
Внешнее воздействие	Требуется	Не требуется	Не требуется	Не требуется
Многократность	Высокая	Ограниченная	Высокая	Средняя
Удорожание смеси	Среднее (10–15 %)	Среднее (12–18 %)	Низкое (5–10 %)	Высокое (свыше 30 %)
Готовность к внедрению	Опытно-промышленная	Опытная	Серийная (частично)	Лабораторная

Анализ экономической целесообразности и экологической безопасности демонстрирует, что внедрение самовосстанавливающихся покрытий приносит ощутимую выгоду благодаря увеличению интервалов между капитальными ремонтами и снижению соответствующих расходов [7–9]. На участках с интенсивным трафиком увеличение эксплуатационного ресурса на 3–5 лет нивелирует первоначальное удорожание смеси (на 10–30 %) и обеспечивает полную окупаемость. К прочим плюсам относятся сокращение времени закрытия полос для движения, снижение углеродного следа от производства и укладки нового материала, а также уменьшение количества отходов фрезерования. Экологический аспект выражается в сохранении природных минеральных запасов и минимизации отходов.

Исследование подтверждает, что использование асфальтобетона с функцией самовосстановления является технически грамотным и экономически выгодным путем повышения долговечности дорожного полотна. Наибольшую результативность показывают решения на базе индукционного нагрева с проводящими добавками, позволяющие многократно и контролируемо восстанавливать структуру. Методы микрокапсулирования и полимерной модификации уместны как вспомогательные меры, не требующие специализированной техники. Оптимальный социально-экономический эффект достигается при дифференцированном подходе: выбор технологии должен зависеть от категории дороги, объема трафика и климата, что обеспечит баланс между инвестициями и полученной выгодой.

Список литературы

1 **Гохман, Л. М.** Реология битумов и асфальтобетонов / Л. М. Гохман. – М. : Транспорт, 2004. – 320 с.

2 **Руденский, А. В.** Реологические свойства битумных вяжущих / А. В. Руденский. – М. : МАДИ, 2015. – 180 с.

3 **Гуреев, А. В.** Применение индукционного нагрева для восстановления асфальтобетонных покрытий / А. В. Гуреев, В. А. Золотарев // Автомобильные дороги. – 2018. – № 5. – С. 45–49.

4 **Чернов, С. А.** Применение электромагнитного нагрева для самовосстановления асфальтобетона / С. А. Чернов, Д. В. Иванов // Дороги России. – 2021. – № 4. – С. 58–63.

5 **Котенко, В. С**. Микрокапсулирование регенерирующих агентов в технологии асфальтобетона / В. С. Котенко, В. В. Ядыкина // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2020. – № 3. – С. 12–16.

6 **Смирнов, А. В.** Микрокапсулированные регенерирующие агенты для самовосстанавливающегося асфальтобетона / А. В. Смирнов, Е. Н. Петрова // Вестник БНТУ. – 2021. – № 3. – С. 55–60.

7 ТКП 059-2020 (33200). Автомобильные дороги. Правила устройства. – Введ. 01.09.2020. – Минск : М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, 2020. – 72 с.

8 ГОСТ 9128-2013. Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. – Введ. 01.11.2014. – М. : Стандартинформ, 2014. – 32 с.

9 Проблемы и перспективы развития транспортной инфраструктуры : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – М. : МАДИ, 2020. – 200 с.

УДК 625.855.3:691.16:532.135

СТРУКТУРНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ БИТУМО-МИНЕРАЛЬНОЙ МАСТИКИ В ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНОМ АСФАЛЬТОБЕТОНЕ

А. А. АФАНАСЕНКО

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА) представляет собой структурированную битумно-минеральную систему, эксплуатационные и технологические свойства которой в значительной степени определяются способностью битумного вяжущего равномерно распределяться и удержи-

ваться на поверхности минерального заполнителя [1]. Высокое содержание щебня и развитая поверхность каменного материала предъявляют повышенные требования к структурной устойчивости мастики. При недостаточной вязкости и структурной прочности возможно стекание или перераспределение битумного вяжущего с поверхности щебня, что нарушает однородность смеси и снижает эффективность формирования требуемой структуры покрытия [2, 3].

Особое значение данная проблема приобретает при производстве и укладке ЩМА, где для стабилизации битумного вяжущего традиционно применяются целлюлозные волокна [1, 2]. Их основная функция заключается не только в повышении вязкости битума, но и в формировании пространственной волокнистой структуры, способной удерживать битумно-минеральную мастику на поверхности крупного заполнителя. Поэтому оценка реологических характеристик должна учитывать не только сопротивление материала течению, но и способность сформированной структуры сохранять целостность при воздействии собственного веса, перемешивания, транспортирования и технологических операций.

Целью работы являлось совершенствование подходов к оценке реологических свойств дисперсных систем на основе битумных вяжущих и установление механизмов структурообразования, определяющих стабилизацию битумной мастики в щебеночно-мастичном асфальтобетоне. Особое внимание уделено разграничению вязкого сопротивления и истинной структурной прочности системы, а также определению роли минерального наполнителя, целлюлозного волокна и полимерного модификатора в формировании устойчивой структуры.

В качестве базового органического вяжущего использовали битум марки 90/130. Для моделирования компонентов битумно-минеральной мастики применяли неактивированный доломитовый минеральный наполнитель, целлюлозное волокно и термопластичный эластомер. Компоненты вводили в предварительно нагретое вяжущее с использованием интенсивного механического перемешивания. Реологические характеристики определяли при температуре 160 °С в широком диапазоне скоростей сдвига [4].

Для оценки характера течения проведено сравнение нескольких реологических моделей [5]. Установлено, что применение упрощенных зависимостей может приводить к существенному завышению структурной прочности битумных систем. В отдельных случаях расчетное значение предела текучести отличалось от значения, полученного по наиболее точной модели, более чем на порядок. Максимальная относительная ошибка для модели Оствальда – де Ваале достигала 1033 %, а для модели Шведова – Бингама 250 %. Причина заключается в том, что при таком подходе сопротивление течению, обусловленное вязкостью материала, может ошибочно интерпретироваться как проявление статической структурной прочности. Наиболее достоверное описание экспериментальных данных получено с использованием модели Гершеля – Балкли, коэффициент детерминации при этом превышал 0,99. Применение данной модели позволяет разделить две принципиально различные составляющие поведения битумной мастики, начальную структурную прочность и последующее вязкопластическое течение после разрушения сформированной структуры.

Исследование влияния минерального наполнителя показало, что его увеличение само по себе не обеспечивает формирования выраженного пространственного несущего каркаса. Даже при содержании доломитового наполнителя до 200 % его связь с истинным пределом текучести оставалась слабой. Полученные результаты свидетельствуют о том, что минеральный наполнитель преимущественно увеличивает вязкость битумной мастики, однако не формирует непрерывной пространственной структуры, способной существенно противодействовать деформации. Следовательно, повышение содержания минерального компонента не может рассматриваться как универсальный способ предотвращения стекания битума с поверхности щебня в ЩМА.

Принципиально иной характер влияния установлен для целлюлозного волокна. При небольшом его содержании структурная прочность битумной системы увеличивается относительно постепенно. Однако при достижении критической концентрации порядка 2,5–3,0 % наблюдается резкое изменение характера структурообразования. Волокна начинают взаимодействовать между собой с образованием пространственно связанного кластера, который распространяется через весь объем битумной мастики. Формируется своеобразный армирующий каркас, способный воспринимать сдвиговые нагрузки и препятствовать перемещению битумного вяжущего относительно минерального заполнителя. Таким образом, целлюлозное волокно выполняет в ЩМА не только функцию загустителя, но прежде всего функцию структурного стабилизатора битумной

мастики. Формируемая волокнистая сетка увеличивает сопротивление системы течению и способствует удержанию вяжущего на развитой поверхности щебня.

Введение полимера также способствует повышению структурной прочности битумной системы, однако характер его воздействия отличается от действия целлюлозного волокна. Влияние полимерного компонента имеет преимущественно линейный характер и связано с укреплением самого битума. Следовательно, данные компоненты выполняют различные структурные функции и могут рассматриваться как взаимодополняющие элементы стабилизации битумно-минеральной системы.

Полученные результаты позволяют рассматривать битумную мастику ЩМА как многофазную структурированную систему, в которой устойчивость определяется не только количеством битума и минерального наполнителя, но и характером взаимодействия между компонентами. Щебень формирует основной минеральный каркас смеси, битум обеспечивает связность и передачу нагрузок [6], а целлюлозное волокно способствует стабилизации мастичной составляющей и предотвращает ее избыточное перемещение. В таком случае реологическая устойчивость мастики становится одним из факторов, определяющих технологическую стабильность всей асфальтобетонной смеси.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности более обоснованного выбора количества стабилизирующего волокна при проектировании составов ЩМА. Поэтому подбор его содержания целесообразно осуществлять не только по показателю вязкости, но и с учетом формирования пространственной структуры и необходимого уровня истинного предела текучести. Применение адекватного реологического моделирования позволяет корректно разделить вязкое сопротивление и структурную прочность, что создает научную основу для оптимизации состава ЩМА, повышения технологической стабильности смеси и более рационального расходования стабилизирующих компонентов.

Список литературы

1 **Blazejowski, K.** Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice / K. Blazejowski. – Boca Raton – London – New York : CRC Press, 2011. – 293 p.

2 **Afanasenka, A. A.** Analytical review of methods for stabilizing asphalt concrete mixtures with increased binder content / A. A. Afanasenka, P. P. Yatsevich, A. V. Koronchik // Bulletin of Civil Engineers. – 2024. – № 3 (104). – P. 59–70. – DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-3-59-70.

3 **Afanasenka, A. A.** Regression Modeling for the Formulation Optimization of a Stabilizing Additive for Stone Mastic Asphalt / A. A. Afanasenka, P. P. Yatsevich // Science & Technique. – 2025. – Vol. 24, № 6. – P. 479–486. – DOI: 10.21122/2227-1031-2025-24-6-479-486.

4 **Zankovich, V. V.** Optimization of asphalt concrete mixtures with high binder content based on technological stability / V. V. Zankovich, A. A. Afanasenko // Avtomobil'nye dorogi i mosty = Roads and Bridges. – 2007. – № 1. – P. 35–39.

5 **Afanasenka, A. A.** Rheological Modeling and Mechanisms of Structure Formation in Disperse Systems Based on Organic Binders / A. A. Afanasenka // ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. – 2026. – Vol. 69, № 4. – P. 327–341. – DOI: 10.21122/1029-7448-2026-69-4-327-341.

6 Mechanoactivated hybrid nanomodifiers for increasing the operational reliability of asphalt concrete / S. A. Zhdanok, P. P. Samtsov, P. P. Yatsevich, A. A. Afanasenka // Journal of Materials and Engineering Structures «JMES». – 2026. – Vol. 13, № 4. – P. 651–666.

УДК 625.85.32

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ КАК СТРУКТУРНЫЕ МОДИФИКАТОРЫ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ

А. А. АФАНАСЕНКО, П. П. ЯЦЕВИЧ
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Современные требования к дорожным покрытиям обусловливают необходимость кардинального повышения долговечности битумных вяжущих [1]. Традиционные методы модификации полимерами, хотя и доказали свою эффективность, имеют технологические ограничения [2]. Принципиально новым направлением является использование углеродных наноматериалов (УНМ), обладающих уникальным сочетанием высокой прочности, упругости и развитой удельной поверхности, что позволяет рассматривать их в качестве высокоэффективных наноразмерных модификаторов вяжущих [3]. Важным аспектом является также влияние углеродных наноматериалов на сопротивление

старению битума, поскольку их введение способно ингибировать образование карбонильных и сульфоксидных групп, замедляя термоокислительную деструкцию и повышая долговечность покрытия [4]. Анализ научной литературы показывает, что для введения УНМ в битум применяются несколько подходов, которые можно разделить на методы физического воздействия и химической модификации [3, 4]. К физическим методам относятся высокоскоростное механическое смешение и ультразвуковая обработка. Механическое смешение обеспечивает разрушение агломератов за счет интенсивных сдвиговых воздействий, тогда как ультразвуковая обработка способствует их деагломерации вследствие кавитационных процессов. Химический подход предусматривает функционализацию поверхности УНМ с целью повышения их сродства с битумом. Также применяются комбинированные способы, предусматривающие использование вспомогательных сред или полимерных носителей.

Целью работы является комплексная оценка влияния углеродных наноматериалов на физико-механические и реологические свойства битумных вяжущих, а также установление механизмов структурообразования в наномодифицированных полимерно-битумных системах [5]. В качестве объекта исследования использован битум марки 70/100 (СТБ EN 12591) и полимерно-битумное вяжущее (ПБВ) на его основе, модифицированное 2,5 % SBS (KTR 401, LG Chem Ltd.). Углеродные наноматериалы синтезированы на НПП «Передовые исследования и технологии» (г. Минск) по оригинальной технологии каталитического пиролиза углеводородного сырья в потоке низкотемпературной плазмы под руководством академика НАН Беларуси С. А. Жданка. Полученный «депозит» представляет собой многокомпонентную смесь структурированных углеродных нанотрубок, нановолокон, аморфного углерода и графитоподобных наночастиц. Технологический процесс получения материала предусматривает также ультразвуковое фракционирование, позволяющее выделять более однородную по дисперсному и морфологическому составу фракцию [6].

На первом этапе исследований была рассмотрена комплексная модификация непосредственно битумного вяжущего [5]. В основу эксперимента положена гипотеза о том, что УНМ способны не только самостоятельно армировать битумную структуру, но и усиливать пространственную сетку, формируемую полимером SBS. Для сравнения исследовались базовый битум 70/100, ПБВ с содержанием 2,5 % SBS и комплексно-модифицированное вяжущее с добавлением УНМ в количестве 1 % от массы полимера SBS. Приготовление комплексного вяжущего осуществлялось в лабораторном высокоскоростном сдвиговом смесителе при интенсивности перемешивания 1200 об/мин в течение 40 мин, что обеспечивало необходимую степень гомогенизации системы.

Оценка свойств проводилась по методикам СТБ EN 1427 (температура размягчения по методу «Кольцо и Шар»), СТБ EN 1426 (пенетрация), а также по температуре хрупкости по Фраасу. Результаты испытаний подтвердили высокую эффективность комплексной модификации. Введение SBS повысило температуру размягчения с 48,2 до 67,8 °C, а добавление УНМ дало дальнейший рост до 76,5 °C, что соответствует общему приросту почти 60 %. Таким образом, именно дополнительное введение УНМ позволило существенно усилить эффект полимерной модификации и повысить теплостойкость полученного вяжущего. Одновременно зафиксировано снижение глубины проникания иглы с 84 до 47 (0,1 мм), что свидетельствует о формировании более жесткой и структурированной системы. Температура хрупкости по Фраасу снизилась с –15,1 до –21,6 °C, указывая на повышение стойкости вяжущего при отрицательных температурах. В совокупности полученные данные свидетельствуют о расширении интервала эксплуатационных температур комплексно-модифициро-ванного вяжущего. Полученный эффект может быть связан с формированием дополнительного структурного каркаса в полимерно-битумной матрице. Согласно сформулированной гипотезе, углеродные наноматериалы, равномерно распределяясь в объеме сетки SBS, выступают в качестве узлов физической сшивки, формируя трехмерную нанополимерную сеть. Такая структура ограничивает подвижность макромолекул при повышенных температурах и способствует увеличению сопротивления вяжущего деформациям, и приводит к росту предела текучести в производственных условиях [7, 8]. При этом принципиальное значение имеет степень диспергирования УНМ, только при разрушении агломератов и достаточно равномерном распределении наноматериала может реализоваться его потенциальный армирующий эффект.

Таким образом, результаты исследования подтверждают перспективность использования УНМ именно в качестве дополнительного структурирующего компонента полимерно-битумных вяжущих. Совместное применение SBS и УНМ позволяет сформировать более устойчивую простран-

ственную структуру материала и одновременно воздействовать на его высоко- и низкотемпературные характеристики. Установленный эффект выражается в росте температуры размягчения на 58,7 % и расширении интервала пластичности на 55 %. Следовательно, углеродные наноматериалы могут рассматриваться как эффективный инструмент направленной модификации битумных вяжущих, позволяющий повысить их теплостойкость, структурную стабильность и эксплуатационный температурный диапазон. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются оптимизация концентрации УНМ и режимов их диспергирования, изучение устойчивости сформированной структуры при длительном термоокислительном старении, а также исследование реологических характеристик наномодифицированных ПБВ. Особое значение имеет установление взаимосвязи между морфологией УНМ, качеством их распределения в полимерной фазе и формированием физически сшитой нанополимерной структуры.

Список литературы

1 Современный ремонтный материал для устранения ямочности на дорожных покрытиях / Е. М. Жуковский, А. В. Корончик, С. Е. Кравченко, Д. В. Глинский // Минск – Шанхай – Чанчунь: стратегия прорывного сотрудничества : сб. материалов науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апр. 2022 г. / М-во образования Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, Республиканское инновационное унитарное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник». – Минск : БНТУ, 2022. – С. 122–124. – EDN QHQGSF.

2 **Yatsevich, P. P.** Comparative Analysis of Property Changes in Modified Asphalt Concretes Depending on the Modification Method and Polymer Concentration in the Binder / P. P. Yatsevich // Science & Technique. – 2024. – Vol. 23, № 2. – P. 140–150. – DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-2-140-150.

3 Advancements of carbon nanomaterials-modified asphalt: Processes, properties, economic feasibility and future perspectives / S. Araby, A. Abdulhamid, U. Bakhbergen [et al.] // Journal of Road Engineering. – 2025. – Vol. 5, № 3. – P. 965–1010.

4 Synergism and Mechanisms of Aging Resistance in the Use of Graphene and Carbon Nanotubes in Bitumen Composites / Q. L. Yang, Q. N. Zhu, R. G. Xu [et al.] // Langmuir. – 2025. – Vol. 41, № 1. – P. 842–857. – DOI: 10.1021/acs.langmuir.4c04182.

5 **Афанасенко, А. А.** Углеродные наноматериалы для дорожного строительства: модификация битумных вяжущих и асфальтобетонов / А. А. Афанасенко, П. П. Яцевич // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2025. – Т. 4, № 45. – С. 14–24.

6 Mechanoactivated hybrid nanomodifiers for increasing the operational reliability of asphalt concrete / S. A. Zhdanok, P. P. Samtsov, P. P. Yatsevich, A. A. Afanasenka // Journal of Materials and Engineering Structures «JMES». – 2026. – Vol. 13, № 4. – P. 651–666.

7 **Afanasenka, A. A.** Rheological Modeling and Mechanisms of Structure Formation in Disperse Systems Based on Organic Binders / A. A. Afanasenka // ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. – 2026. – Vol. 69, № 4. – P. 327–341. – DOI: 10.21122/1029-7448-2026-69-4-327-341.

8 **Afanasenka, A. A**. Analytical review of methods for stabilizing asphalt concrete mixtures with increased binder content / A. A. Afanasenka, P. P. Yatsevich, A. V. Koronchik // Bulletin of Civil Engineers. – 2024. – № 3 (104). – P. 59–70. – DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-3-59-70.

УДК 625.7/8

АДАПТАЦИЯ ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ К ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ КЛИМАТИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ: ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ И СОДЕРЖАНИЮ

Г. В. АХРАМЕНКО

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В последние десятилетия на территории Республики Беларусь наблюдается устойчивая тенденция изменения климатических норм, которая напрямую влияет на сроки службы дорожных конструкций и безопасность дорожного движения. Учащение экстремальных погодных явлений, таких как аномальная жара, продолжительные ливни, чередование оттепелей и резких похолоданий, требует пересмотра традиционных подходов к проектированию и содержанию автомобильных дорог.

По данным климатического мониторинга, количество циклов замораживания-оттаивания в переходные периоды увеличилось на 15–20 % по сравнению с нормативными показателями конца XX века [1, с. 42]. Это приводит к ускоренному накоплению повреждений в асфальтобетонных покрытиях (сетка трещин, выбоины, шелушение) и снижению их шероховатости, что критически сказывается на коэффициенте сцепления колеса с дорогой. В связи с этим адаптация дорожной инфраструктуры становится неотъемлемой частью реализации концепции «Безопасная система» (Safe System Approach), направленной на минимизацию тяжести последствий ДТП.

Адаптация на этапе проектирования должна базироваться на актуализации дорожно-климатических зон и пересмотре расчетных гидрологических параметров.

Во-первых, экстремальные осадки требуют увеличения пропускной способности систем водоотвода. Застой воды на проезжей части и обочинах не только размывает земляное полотно, но и создает риск аквапланирования. Научные разработки БелДОРНИИ показывают, что для магистральных дорог и улиц высокой категории необходимо закладывать увеличенные диаметры водопропускных труб и применять открытые лотковые системы с защитой от размыва [2, с. 115].

Во-вторых, изменение температурного режима требует перехода на вяжущие с расширенным диапазоном рабочих температур. Традиционные битумы в условиях аномальной летней жары подвержены сдвигам, а зимой – температурному растрескиванию. Решением является широкое применение полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) и битумов, модифицированных резиновой крошкой, которые обеспечивают высокую трещиностойкость и колееустойчивость [3, с. 58].

В-третьих, для повышения пассивной безопасности в условиях участившихся метелей и снежных заносов, при проектировании новых участков необходимо предусматривать увеличение ширины обочин и устройство снегозащитных лесополос с учетом розы ветров, а на существующей сети – применять антибликовые экраны и усовершенствованные типы барьерных ограждений, сохраняющие работоспособность при температурных деформациях.

Содержание дорожной инфраструктуры в новых климатических реалиях требует перехода от реактивного (устранение последствий) к предиктивному (прогнозирование и превентивные меры) подходу.

Зимнее содержание претерпевает существенные изменения. Традиционные твердые реагенты (техническая соль) малоэффективны при низких температурах (ниже –10... –15 °С), сдуваются ветром с проезжей части и не работают на сухом покрытии. Учащение экстремальных явлений (резкие перепады температур, ледяные дожди) требует более быстрых и точных методов. Поэтому наиболее удачным решением будет внедрение технологий превентивной обработки дорожного покрытия до начала выпадения осадков или непосредственно перед падением температуры ниже точки замерзания. Так, ОАО «Белавтодор» и подведомственные дорожно-эксплуатационные предприятия (ДЭП) активно адаптируют стратегии содержания к новым климатическим реалиям, делая ставку на жидкие и комбинированные реагенты. К таким технологиям относятся:

– технология предварительного смачивания (Pre-wetting): при распределении твердых реагентов (NaCl) они предварительно смачиваются жидкими растворами (хлорида кальция или магния). Это предотвращает «отскок» и сдувание гранул с дороги ветром и колесами, ускоряет начало плавления и снижает общий расход соли на 20–30 %;

– использование чистых жидких противогололедных реагентов (ЖПР) и модифицированных рассолов: на дорогах важного значения (особенно на мостовых сооружениях, путепроводах и участках с высокой интенсивностью движения, где риск образования «черного льда» максимален) применяются чистые жидкие реагенты на основе хлоридов кальция ($CaCl_2$) и магния ($MgCl_2$). Они работают при более низких температурах (до –20... –30 °С) и обладают экзотермическим эффектом (выделяют тепло при растворении);

– применение органических добавок (ингибиторов): для решения проблемы экологии и быстрого смыва реагентов с мокрой дороги в Беларуси тестируются и применяются модифицированные ЖПР с добавлением органических компонентов (например, свекловичной мелассы или техлигнина). Органика повышает адгезию (липкость) жидкости к асфальтобетону, продлевая срок ее действия, и снижает коррозионную активность хлоридов по отношению к металлу мостов и арматуре.

Переход на ЖПР и предварительное смачивание позволяет сократить общее количество хлоридов, попадающих в придорожные почвы и водоемы, что критически важно в условиях увеличения количества жидких осадков зимой (дожди, мокрый снег), которые интенсивно вымывают реагенты. Кроме того, жидкие реагенты не вызывают резких локальных перепадов температур, которые провоцируют термические трещины на асфальтобетоне. Это продлевает межремонтные сроки дорожного покрытия в условиях климатического стресса.

Летнее содержание в условиях жары требует особого внимания к состоянию швов сопряжения и краевым зонам проезжей части, где наиболее вероятно образование колейности. Для восстановления шероховатости и сцепных качеств на участках концентрации ДТП (ОКДТ) необходимо применять технологии фрезерования с последующим устройством шероховатых поверхностных обработок (ЩПО) или тонкослойных покрытий из щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА).

Наиболее важным элементом адаптации является непрерывный мониторинг состояния дорожной инфраструктуры. Автоматизированные комплексы диагностики, позволяющие в непрерывном режиме оценивать ровность, прочность и сцепные качества покрытия, должны интегрироваться с системами метеомониторинга. Это позволит выявлять участки, где климатические воздействия привели к критическому снижению коэффициента сцепления, и оперативно применять меры по повышению безопасности (нанесение высокошероховатых слоев разметки, установка искусственных неровностей или предупреждающих знаков с переменной информацией) [5, с. 102].

На основе проведенного анализа и научных разработок в области адаптации дорожной инфраструктуры к экстремальным климатическим воздействиям, предлагается:

1) внести изменения в нормативные документы (ТКП, СТБ) в части увеличения расчетных коэффициентов интенсивности осадков при проектировании водоотводных сооружений на автомобильных дорогах I–III категорий;

2) расширить применение пористых асфальтобетонов и ЩМА на участках с высокими требованиями к безопасности (спуски, подъемы, подходы к мостам, пешеходные переходы) для снижения риска аквапланирования и повышения шумопоглощения;

3) актуализировать отраслевые руководства по зимнему содержанию с акцентом на превентивное применение жидких реагентов и механизированное удаление снега без повреждения разметки и покрытий.

Таким образом, адаптация дорожной инфраструктуры к экстремальным климатическим воздействиям – это комплексная задача, требующая синергии проектных решений, инновационных материалов и современных технологий содержания. Только системный подход, опирающийся на актуальные научные исследования, позволит обеспечить не только долговечность дорожных конструкций, но и безусловную безопасность участников дорожного движения.

Список литературы

1 Климатические изменения и их влияние на транспортную инфраструктуру Республики Беларусь : монография / под ред. А. В. Иванова. – Минск : БелДОРНИИ, 2023. – 184 с.

2 ТКП 45-3.02-319-2021 (02250). Автомобильные дороги. Проектирование земляного полотна. – Введ. 01.01.2022. – Минск : Минстройархитектуры, 2021. – 45 с.

3 **Рогожник, М. И.** Совершенствование методов проектирования асфальтобетонов с учетом климатических воздействий / М. И. Рогожник, В. П. Сидоров // Дороги и мосты : сб. науч. тр. / БелДОРНИИ. – Минск, 2024. – Вып. 22. – С. 54–62.

4 СТБ 2385-2022. Материалы противогололедные жидкие. Технические условия. – Введ. 01.07.2022. – Минск : БелГИСС, 2022. – 12 с.

5 Методические рекомендации по оценке и обеспечению безопасности дорожного движения на участках концентрации ДТП / БелДОРНИИ. – Минск, 2023. – 88 с.

УДК 625.7/8:502.17

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД НА ЭКОЛОГИЮ: ОЦЕНКА РИСКОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Г. В. АХРАМЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

П. Г. АХРАМЕНКО
Международный университет Федерации профсоюзов Беларуси (*МИТСО*)
Гомельский филиал

Современное дорожное строительство находится на этапе перехода к принципам устойчивого развития, где наряду с прочностью и безопасностью дорожных конструкций приоритетное значение приобретают экологические критерии. В Республике Беларусь, взявшей курс на формирование «зеленой» экономики и циркулярных производственных цепочек, вопрос применения новых материалов в дорожных одеждах напрямую связан с решением таких экологических проблем, как накопление промышленных и бытовых отходов, загрязнение почв и водных объектов, а также выбросы парниковых газов [1, с. 18].

Новые материалы для дорожных одежд – это, прежде всего, продукты переработки отходов (асфальтобетонная крошка, резиновая крошка металлургические шлаки и т. д.), модифицированные вяжущие, а также технологии, снижающие энергозатраты при производстве (теплые асфальтобетоны). Их широкое внедрение создает как значительные экологические преимущества, так и новые риски, требующие научного обоснования.

Опыт Республики Беларусь уже включает успешные проекты внедрения новых материалов. В 2023–2024 гг. на участках автомобильных дорог М-4 Минск – Национальный аэропорт «Минск» и Р-23 Минск – Микашевичи были уложены экспериментальные участки асфальтобетона с добавлением резиновой крошки (15–20 % от массы вяжущего). Мониторинг показал повышение коэффициента сцепления на 12–15 % и снижение уровня шума на 3–4 дБ по сравнению с традиционными покрытиями [2, с. 45].

На региональных дорогах Гродненской области успешно применен регенерированный асфальтобетон с содержанием RAP до 25 %. Это позволило сократить расход первичного щебня на 1 200 т и битума на 85 т на 1 км дороги, что эквивалентно снижению выбросов CO_2 на 180 т [3, с. 62].

В таблице 1 представлена сравнительная характеристика традиционных и новых материалов.

Таблица 1 – **Сравнительная характеристика материалов для дорожных одежд**

Материал	Состав / Технология	Экологические преимущества	Технические характеристики	Область применения	Потенциальные риски
Традиционный асфальтобетон	Щебень, песок, минеральный порошок, битум	–	Проверенная технология, высокая прочность	Все категории дорог	Высокий расход первичных ресурсов, значительные выбросы при производстве
Асфальтобетон с RAP	До 30 % асфальтобетонной крошки + первичные материалы	Сокращение отходов, экономия ресурсов на 20–30 %, снижение выбросов CO_2	Аналогичны традиционному при содержании RAP до 25 %	Нижние слои покрытий, основания дорог II–IV категорий	Необходимость контроля качества крошки, возможное снижение пластичности при высоком содержании RAP
Асфальтобетон с резиновой крошкой	Битум, модифицированный резиновой крошкой (15–20 %)	Утилизация отработанных шин, снижение шума на 3–5 дБ	Повышенная трещиностойкость, коэффициент сцепления выше на 10–15 %	Городские улицы, участки концентрации ДТП, мостовые сооружения	Более высокая стоимость, необходимость специального оборудования
Теплый асфальтобетон (WMA)	Снижение температуры производства на 20–40 °C	Сокращение выбросов на 25–35 %, экономия энергии	Свойства аналогичны горячему асфальтобетону	Все категории дорог, особенно вблизи населенных пунктов	Требует точного соблюдения технологии, чувствителен к влажности заполнителей
Пористый асфальтобетон	Специальная гранулометрия, 18–22 % пустот	Отвод ливневых вод, снижение эффекта аквапланирования, шумопоглощение	Высокая водопроницаемость (до 500 мм/ч), хорошее сцепление	Скоростные магистрали, городские проспекты	Сниженная морозостойкость, требует качественного водоотвода
Щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА)	Повышенное содержание щебня, стабилизирующие добавки	Долговечность (срок службы на 30–40 % выше), редкие ремонты	Высокая колеестойчивость, стабильность	Участки с интенсивным движением, тяжелонагруженные дороги	Повышенный расход вяжущего, требовательность к качеству материалов

Примечание – Таблица составлена на основе данных [2–4].

Несмотря на очевидные преимущества, применение новых материалов сопряжено с рядом экологических рисков, которые необходимо оценивать на стадии проектирования.

При использовании промышленных побочных продуктов (шлаков, золы ТЭЦ, фосфогипса) существует опасность миграции в окружающую среду тяжелых металлов, сульфатов и радионуклидов. Исследования БелДОРНИИ показывают, что безопасное применение таких материалов возможно только при условии их предварительной сертификации и соблюдения требований ОНД-97 по предельно допустимым концентрациям вредных веществ [6, с. 32]. Обязательным является устройство защитных слоев из инертных материалов и гидроизоляции в зонах водоохранных территорий.

Применение резиновой крошки и полимерных добавок в условиях интенсивного ультрафиолетового воздействия может сопровождаться выделением летучих органических соединений. Современные исследования подтверждают, что при использовании стабилизированных материалов и защитных покрытий этот риск минимизируется, однако требуется дальнейшая актуализация гигиенических нормативов.

На основе анализа научных разработок и практического опыта предлагается:

1) расширить применение регенерированного асфальтобетона (RAP) до 30 % в составе нижних слоев покрытий автомобильных дорог II–IV категорий с одновременной актуализацией соответствующих СТБ;

2) внедрить обязательную экологическую экспертизу новых дорожных материалов, включая оценку жизненного цикла (LCA) и миграции вредных веществ;

3) создать пилотные полигоны для долгосрочного мониторинга экспериментальных участков дорог с новыми материалами (не менее 5 лет наблюдения);

4) разработать систему экономических стимулов для подрядчиков, применяющих экологичные материалы (снижение залоговых сумм, приоритет в тендерах);

5) организовать межведомственное взаимодействие между дорожными организациями и предприятиями по переработке отходов для создания устойчивых логистических цепочек поставок вторичных материалов.

Таким образом, новые материалы для дорожных одежд являются эффективным инструментом решения экологических проблем при условии их научно обоснованного применения, строгого контроля на всех этапах жизненного цикла и интеграции в нормативно-техническую базу Республики Беларусь. Приведенные примеры и сравнительный анализ подтверждают, что экологичные материалы не уступают традиционным по техническим характеристикам, а по ряду параметров превосходят их, обеспечивая синергию экологических и инженерных подходов.

Список литературы

1 Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2030 года : утв. Указом Президента Респ. Беларусь от 27 дек. 2023 г. № 547. – Минск : Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь, 2023. – 42 с.

2 **Козловский, В. А.** Применение регенерированного асфальтобетона в дорожных одеждах: опыт и перспективы / В. А. Козловский, С. Н. Лис // Дороги и мосты : сб. науч. тр. / БелДОРНИИ. – Минск, 2024. – Вып. 23. – С. 40–49.

3 **Петренко, А. С.** Экологические аспекты применения резиновой крошки в дорожном строительстве / А. С. Петренко, М. И. Рогожник // Вестник БелДОРНИИ. – 2024. – № 2. – С. 58–67.

4 ТКП 45-3.02-345-2023 (02250). Автомобильные дороги. Технология производства теплых асфальтобетонов. – Введ. 01.01.2024. – Минск : Минстройархитектуры, 2023. – 28 с.

УДК 656.05

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ ПО КАПИТАЛЬНОМУ РЕМОНТУ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

Г. В. АХРАМЕНКО, Н. А. СОЛОХИН
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Развитие транспортной инфраструктуры Республики Беларусь является одним из приоритетных направлений государственной политики. В условиях постоянного роста интенсивности движения и увеличения осевых нагрузок на дорожное покрытие сеть автомобильных дорог требует регулярного проведения капитального ремонта. В отличие от текущего ремонта, капитальный ремонт предполагает замену дорожных конструкций, изменение геометрии дороги, укрепление земляного полотна и, как следствие, длительное (от нескольких месяцев до года) и масштабное ограничение движения транспортных средств [1].

Места производства работ (МППР) при капитальном ремонте традиционно являются зонами повышенной аварийности. Возникает острый конфликт между непрерывностью транспортного процесса и необходимостью выполнения строительно-монтажных работ. Обеспечение безопасности дорожного движения (БДД) в таких условиях требует не просто формального соблюдения правил расстановки знаков, а комплексного подхода к организации дорожного движения (ОДД), учитывающего психологию водителя, технические средства организации движения и строгий контроль со стороны уполномоченных органов.

В Республике Беларусь требования к БДД при ремонте дорог регламентированы Законом РБ «О дорожном движении» [1], Правилами дорожного движения (ПДД) [3] и Техническим кодексом

установившейся практики ТКП 211-2010 (02110) «Безопасность дорожного движения. Требования к организации и производству работ по ремонту и содержанию автомобильных дорог» [2].

Специфика капитального ремонта заключается в следующем:

– длительность воздействия. Если текущий ремонт длится часы или сутки, то капитальный ремонт формирует устойчивую, но нестандартную дорожную обстановку на месяцы. Водители, регулярно проезжающие через данный участок, могут терять бдительность из-за «привыкания» к препятствиям;

– изменение геометрии и условий движения. Часто требуется устройство временных объездов, перенос оси проезжей части, устройство временных пересечений с другими дорогами;

– высокая доля тяжелой техники. Строительные механизмы (укладчики, катки, самосвалы) обладают низкой динамикой разгона и большими габаритами, что опасно при их выезде на временные полосы движения.

Согласно ТКП 211-2010, до начала работ заказчик и подрядчик обязаны разработать и согласовать с подразделениями ГАИ МВД Республики Беларусь схему организации дорожного движения [2]. Однако на практике схемы ОДД зачастую разрабатываются формально, без учета реальной интенсивности движения, скоростного режима и психофизиологических особенностей восприятия дороги водителем в переходных зонах.

Исследования аварийности в местах производства дорожных работ в РБ показывают, что основными причинами ДТП являются:

– эффект «бутылочного горлышка». Резкое сужение проезжей части (переход с двух полос на одну) вызывает необходимость экстренного торможения и перестроения, что приводит к наездам сзади и боковым столкновениям;

– недостаточная контрастность и освещенность. В темное время суток водители часто не успевают идентифицировать границы временного сужения или бетонных блоков, что приводит к наездам на элементы ограждения;

– нарушение логистики строительной техники. Выезд тяжелой техники на действующую проезжую часть вне установленных мест или без сопровождения автомобиля прикрытия.

Для минимизации рисков при капитальном ремонте в условиях Республики Беларусь необходимо внедрять комплекс мер, выходящих за рамки минимальных требований нормативов.

1 Применение жестких и амортизирующих ограждений. ТКП 211-2010 допускает использование дорожных конусов и сигнальных столбиков на участках с низкой скоростью. Однако при капитальном ремонте магистральных дорог и дорог республиканского значения, где расчетная скорость превышает 60 км/ч, необходимо применять водоналивные пластиковые блоки, заполненные песком или водой, а также бетонные барьерные ограждения [2]. В конце переходных зон (в местах сужения) особенно важно устанавливать амортизирующие устройства (демпферы), которые поглощают энергию удара и снижают тяжесть последствий для водителя.

2 Динамическое управление схемой ОДД. Организация движения не должна быть статичной. Подрядная организация совместно с заказчиком и ГАИ должна применять гибкие схемы: если на одном из этапов ремонта техника не занимает всю ширину полосы, движение должно быть организовано по двум полосам с разделением их временным барьерным ограждением, а не сужено до одной полосы. Это исключит искусственное создание заторов и агрессивного вождения.

3 Информационное сопровождение и табло переменной информации. Заранее, за 1000, 500 и 150 метров до начала МППР, необходимо устанавливать не только стандартные знаки (1.23 «Дорожные работы», таблички с ограничением скорости), но и переносные светодиодные табло с переменной информацией. Надписи вроде «ВНИМАНИЕ! СУЖЕНИЕ ДОРОГИ», «РАБОТАЕТ ТЕХНИКА», «СОБЛЮДАЙ ДИСТАНЦИЮ» привлекают внимание водителя значительно эффективнее, чем статичные знаки [4].

4 Освещение мест производства работ. Капитальный ремонт часто ведется круглосуточно. Зоны сужения, места установки временных светофоров и границы бетонных блоков должны освещаться стационарными мачтовыми прожекторами или автономными светодиодными светильниками, исключающими эффект ослепления водителей встречных транспортных средств.

5 Взаимодействие с подразделениями ГАИ и общественностью. Согласование схемы ОДД в ГАИ является обязательным этапом [1]. Кроме того, в условиях капитального ремонта, затрагивающего целые районы, необходимо заблаговременно информировать население через региональные СМИ и навигационные сервисы об изменении маршрутов, введении временных объездов и ограничении скоростного режима.

Обеспечение безопасности дорожного движения при капитальном ремонте автомобильных дорог в Республике Беларусь требует перехода от формального выполнения нормативов к риск-ориентированному подходу. Ключевыми факторами снижения аварийности являются использование жестких ограждающих конструкций вместо мягких конусов, применение динамических схем ОДД, активное использование световой и информационной индикации, а также жесткий контроль за логистикой строительной техники. Только системное взаимодействие заказчика, подрядчика, проектной организации и подразделений ГАИ МВД РБ позволит сохранить жизни и здоровье участников дорожного движения в период масштабного обновления дорожной сети.

Перспективным направлением дальнейшего совершенствования является внедрение цифровых технологий контроля. Использование систем видеоаналитики и беспилотных летательных аппаратов для мониторинга соблюдения схем ОДД в режиме реального времени позволит выявлять и оперативно устранять нарушения со стороны как водителей, так и дорожных служб. Неотъемлемой частью стратегии должно стать повышение культуры безопасности среди персонала подрядных организаций: регулярное обучение рабочих правилам нахождения в зоне движения существенно снизит риск производственного травматизма. В конечном итоге инвестиции в современные средства организации движения окупаются снижением экономического ущерба от ДТП и формированием доверия граждан к организациям дорожного хозяйства (ОАО «Белавтодор»).

Список литературы

1 О дорожном движении : Закон Респ. Беларусь от 5 янв. 2008 г. № 313-З (в ред. Законов Республики Беларусь от 10 янв. 2023 г. № 250-З) // Эталон-Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2026.

2 ТКП 211-2010 (02110) «Безопасность дорожного движения. Требования к организации и производству работ по ремонту и содержанию автомобильных дорог». – Введ. впервые : введ. в действие 01.01.2011 / М-во транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь. – Минск : БелГИСС, 2010. – 45 с.

3 Правила дорожного движения Республики Беларусь : утв. Указом Президента Респ. Беларусь от 28.04.2021 № 184 (в ред. Указа от 17.02.2023 № 71) // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система (дата обращения: 09.09.2026).

4 **Бугаев, Н. Н.** Организация дорожного движения : учеб. пособие / Н. Н. Бугаев, А. В. Бахур. – Минск : БНТУ, 2018. – 214 с.

УДК 625.71.8

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РОВНОСТЬ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Н. В. БАНДЮК, А. А. ВАСИЛЬЕВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

На автомобильных дорогах общего пользования Республики Беларусь наблюдаются сравнительно низкие средние скорости движения, сокращённые сроки службы дорожных одежд и повышенная аварийность. При этом геометрические параметры дорог и динамические характеристики современных автомобилей в большинстве случаев соответствуют нормативным требованиям. Сочетание этих факторов приводит к росту себестоимости автомобильных перевозок.

Для сети автомобильных дорог общего пользования характерна недостаточная плотность, на отдельных участках – недостаточная пропускная способность. Технический уровень и эксплуатационное состояние дорожной сети в целом не соответствуют современным требованиям, сроки службы основных дорожных сооружений сокращены.

По данным РОСДОРНИИ, около 60 % федеральных дорог России требуют ремонта: более 50 % – усиления дорожной одежды, 40 % – улучшения сцепных свойств покрытия, 23 % – улучшения ровности. Средний фактический срок службы нежёстких дорожных одежд на федеральных дорогах составляет около пяти лет. Аналогичная ситуация наблюдается на части республиканских дорог Беларуси: в 2025 г. 23 % их протяжённости не соответствовали нормативным требованиям и требовали ремонта. В соответствии с Государственной программой [1] на 2026–2030 гг. запланировано отремонтировать, построить и реконструировать 9 700 км республиканских дорог (60,8 % общей протяжённости), в том числе: текущий ремонт – 9 025,2 км (56,60 %), капитальный ремонт – 450 км (2,82 %), строительство и реконструкция – 224,8 км (1,41 %).

Скорость транспортного потока определяется рядом факторов, среди которых ровность покрытия играет одну из ключевых ролей. Пропускная способность при этом зависит прежде всего от геометрических параметров и организации движения. Достигаемая ровность, в свою очередь, определяется прочностью дорожной одежды, а также конструктивными, технологическими и эксплуатационными факторами.

Основные факторы, определяющие эксплуатационную ровность проезжей части автодорог:

– конструктивные: соответствие использованных материалов и их характеристик – проектным; параметры, определяющие величину действующих максимальных активных напряжений сдвига от расчетной нагрузки в грунте рабочего слоя и верхней части земляного полотна, что особенно важно для связных грунтов (толщина и модули упругости конструктивных слоёв и грунта земляного полотна, угол внутреннего трения грунта, удельное давление расчетной нагрузки на покрытие и др.); тип грунта земляного полотна, его влажность в расчетный период ослабления прочности дорожной одежды и др.; армирование различными способами конструктивных слоёв дорожной одежды и др.;

– технологические: качество выполнения работ по устройству земляного полотна и дорожного покрытия, допустимые и фактические значения начального и конечного (за срок службы) показателей ровности дорожной одежды; фактическая достигнутая и установившаяся степень уплотнения грунта земляного полотна с учетом влияния разуплотнения при его сезонном промерзании-оттаивании; технологические возможности дорожных машин, используемых при строительстве и ремонте дорожной одежды, по обеспечению её требуемой ровности и др.;

– эксплуатационные: интенсивность, скорость, состав движения транспортного потока, приведенный к расчетному автомобилю; климатические и грунтово-гидрологические условия эксплуатации дорожной одежды (число расчетных дней в году, расчетная схема увлажнения, глубина промерзания и др.).

Систематизация факторов, определяющих ровность покрытий, анализ количественных связей между параметрами дорожной одежды и ровностью позволяют вырабатывать рекомендации по назначению мероприятий, обеспечивающих требуемую ровность в течение срока службы.

Список литературы

1 Государственная программа «Дороги Беларуси» на 2026–2030 годы : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 29 дек. 2025 г. № 776 и действует с 1 янв. 2026 г. – 95 с. // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500776 (дата обращения: 21.09.2026).

УДК 625.7

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В ТЕМНОЕ ВРЕМЯ СУТОК СРЕДСТВАМИ ОСВЕЩЕНИЯ

И. С. БОРОДИН
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Автомобильные дороги предназначены для обеспечения безопасного движения транспортных средств с установленными скоростями и нагрузками на протяжении всего срока службы. Факторы и условия, повышающие риск возникновения ДТП, травматизма и гибели людей, принято относить к угрозам безопасности дорожного движения. Можно выделить три основных типа таких угроз.

Первый – человеческий фактор: нарушение правил дорожного движения, недостаток практического опыта вождения, усталость, снижение внимания. Второй – дорожные условия: неудовлетворительное качество покрытия, недостаточное освещение в тёмное время суток, неблагоприятные погодные условия, слаборазвитая инфраструктура для пешеходов и велосипедистов на загородных участках. Третий – технический фактор: устаревший автопарк, изношенные или некачественные детали, прочие неисправности транспортных средств.

Отдельной и всё более значимой угрозой безопасности движения становятся крупные дикие животные, особенно с наступлением сумерек. Согласно данным Государственной инспекции охраны животного и растительного мира, в Беларуси с января по август 2026 года зарегистрировано 3593 ДТП с участием диких животных, что на 7,3 % превышает показатель аналогичного периода

прошлого года. Более 90 % таких происшествий приходится на столкновения с лосями и косулями. Наиболее опасны для людей встречи именно с лосями: аварии с их участием нередко приводят к гибели или тяжёлым травмам человека.

На отдельных участках автомагистралей и скоростных дорог обустроены ограждения, препятствующие выходу диких животных на проезжую часть, а также скотопрогоны и экодуки под дорогами. Однако протяжённость таких «закрытых» участков составляет небольшой процент от всей протяжённости дорожной сети Республики Беларусь. Это обстоятельство подталкивает к поиску иных решений, повышающих безопасность движения, в первую очередь в тёмное время суток.

Ночная поездка представляет повышенную опасность прежде всего для водителей с небольшим практическим опытом, однако полностью исключить этот риск нельзя и для других категорий участников движения. Уязвимость дополнительно возрастает на неосвещённых участках.

При вождении значительная часть информации поступает человеку через зрение. Ночью способность различать контраст, детали объектов и изменения дорожной обстановки заметно ухудшается, вследствие чего вероятность ДТП возрастает. В тёмное время суток риск аварии для участников движения примерно в 1,5–2 раза выше, чем днём. Животные, напротив, хорошо ориентируются в темноте, а искусственный свет создаёт для них дискомфорт и отпугивает, заставляя двигаться затенёнными участками местности. Именно в этом заключается основное противоречие, которое приходится учитывать при проектировании освещения в зонах миграции.

Достаточная освещённость дорожного полотна позволяет водителю раньше заметить препятствие или изменение ситуации и своевременно принять решение. Помимо повышения безопасности, это делает движение ночью более комфортным. Анализ мирового опыта показывает, что рациональное освещение способно сократить число ДТП примерно на 30 %, в том числе за счёт лучшей видимости дорожных знаков и потенциальных опасностей. Согласно обобщению результатов многолетних отечественных и зарубежных исследований, применение освещения автомобильных дорог связано со снижением смертельных исходов примерно на 65 %, ДТП с пострадавшими – примерно на 30 %, а материального ущерба от происшествий ночью – примерно на 15 %.

Особого внимания требуют пешеходные переходы и пути миграции животных. Грамотное освещение пешеходных переходов улучшает восприятие дорожной ситуации и даёт водителю больше времени на реакцию при возникновении опасности. Освещение дорог в зонах миграции животных – задача сложная и неоднозначная. С одной стороны, свет необходим для безопасности водителей, с другой – он оказывает серьёзное влияние на диких животных, зачастую негативное. Искусственное освещение создаёт так называемый «световой барьер», который животные либо избегают, либо, наоборот, к которому их влечёт. И в том, и в другом случае это может свести на нет эффективность даже специально построенных переходов. Именно поэтому при проектировании освещения вблизи путей миграции применяются специальные меры: используется тёплый свет с низкой цветовой температурой, светильники с закрытыми плафонами и точным направлением потока только на проезжую часть, а также – где это возможно – диммирование или полное отключение света в периоды критической активности животных.

В связи с вышесказанным для каждого класса дороги установлены соответствующие нормативные требования к минимальным и максимальным характеристикам освещения, среди которых:

– общая яркость дорожного полотна;
– относительная неравномерность распределения яркости;
– продольная равномерность распределения яркости;
– средняя освещённость дорожного покрытия;
– равномерность распределения освещённости.

Проектирование системы освещения автомобильной дороги можно разделить на четыре базовых этапа.

Первый – определение необходимых условий освещения: анализ интенсивности и плотности движения транспортного потока, типа дороги, погодных условий; важно также учесть окружающую инфраструктуру и энергоэффективность применяемой технологии освещения. Второй – выбор источников света, при котором определяющими критериями становятся надёжность, длительность службы и энергоэффективность. Третий – расстановка светильников, обеспечивающая равномерность освещения и минимизацию теневых зон. Четвёртый – техническое обслуживание оснащения: периодическая проверка и замена отработавших элементов, что, в свою очередь, снижает количество аварий и продлевает срок службы осветительной системы.

При реализации проектов освещения в стандартных условиях необходимо выполнить комплекс мероприятий, включающий геодезические разбивочные работы, земляные работы по рытью траншей и котлованов для устройства подземной кабельной сети и монтажа опорных конструкций, монтаж проводки, установку осветительной арматуры и другие сопутствующие работы.

Оптимизация затрат может быть достигнута за счёт сокращения количества элементов осветительной системы. Однако такая мера нередко приводит к снижению качества освещения, что, в свою очередь, требует от соответствующих организаций приобретения более мощных и дорогих световых приборов. Идеальным решением при выборе источников света для искусственного освещения является использование высокоэффективных ламп с точной фокусировкой светового потока. Однако в первую очередь на целесообразность использования тех или иных методов освещения автомобильной дороги влияет их экономичность.

Таким образом, обеспечение безопасности дорожного движения в тёмное время суток представляет собой комплексную задачу, требующую системного подхода и взаимодействия всех участников дорожного движения, государственных органов и эксплуатирующих организаций. Освещение автомобильных дорог является одним из наиболее эффективных и экономически обоснованных решений, позволяющих существенно снизить количество ДТП, травматизма и гибели людей в ночное время. При этом важно учитывать не только технические характеристики осветительных систем, но и особенности конкретных участков дорог, интенсивность движения, наличие пешеходных переходов и путей миграции животных. Современные технологии, в частности светодиодные источники света, открывают широкие возможности для повышения энергоэффективности и долговечности дорожного освещения. Однако не менее важным остаётся вопрос своевременного технического обслуживания и контроля за состоянием осветительного оборудования. Только комплексный подход, включающий проектирование, монтаж, эксплуатацию и модернизацию систем освещения, способен обеспечить устойчивое снижение аварийности в тёмное время суток. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на разработку адаптивных систем освещения, реагирующих на изменение дорожной обстановки в реальном времени. Это позволит не только повысить безопасность, но и оптимизировать энергопотребление, что особенно важно в условиях растущих требований к экологичности и экономичности инфраструктуры.

УДК 625.84

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ НА УЧАСТКЕ РЕКОНСТРУКЦИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ М-10

Д. А. БРЕЛЬ
Дорожно-строительный трест № 2, г. Гомель, Республика Беларусь

При динамично развивающейся обстановке в Европейском регионе Республика Беларусь остается надежным элементом транснациональной транспортной сети. Географическое положение и равнинный рельеф позволяют рассматривать дорожную сеть Беларуси как обязательный элемент потенциального транзитного маршрута Восток – Запад. Автомобильная дорога М-10 «Граница Российской Федерации (Селище) – Гомель – Кобрин» пересекает территорию республики с востока на запад и является кратчайшим и наиболее удобным маршрутом для перевозки грузов и пассажиров из стран по данному маршруту.

Транспортно-эксплуатационное состояние и геометрические параметры значительной доли автомобильной дорог М-10 с учетом перспективной интенсивности движения можно считать неудовлетворительными. Прогнозная перспективная интенсивность движения на двадцатилетний период с учетом генерируемого трафика (на 2044 год) по автомобильной дороге М-10 «Граница Российской Федерации (Селище) – Гомель – Кобрин» оценивается в диапазоне от 8000 до 23000 автомобилей в сутки. Согласно данным РУП «Белдорцентр», на отдельных участках рассматриваемой дороги показатель ровности покрытия превышает 8 IRI (м/км). Ровность определяет скорость движения, аварийность, экономические показатели перевозочного процесса. При этом значительная часть трассы остается двухполосной, что не соответствует фактической

интенсивности и приводит к снижению пропускной способности. Перечень приведенных факторов обуславливает необходимость реконструкции. Реконструкция позволит увеличить инвестиционную привлекательность региона (транспортное и экономическое развитие Полесья – одна из приоритетных задач южных регионов), привлечь новые транспортные потоки, уменьшить срок доставки грузов, снизить количество дорожно-транспортных происшествий, повысить комфортность дорожного движения, улучшить экологическую ситуацию в регионе.

В качестве материала покрытия в проекте реконструкции принят цементобетон. Жесткие дорожные одежды на территории Республики Беларусь, устроенные за последнее десятилетие, зарекомендовали себя как надежные и прочные конструкции, способные выдерживать высокие транспортные нагрузки. Дорожный бетон не лишен и недостатков: недостаточная устойчивость к коррозии, необходимость устройства температурных швов, риск образования уступов между плитами при эксплуатации, вероятность образования сколов и трещин и пр. Усложняется содержание покрытия в разные периоды года. Потенциальный ямочный ремонт с применением смесей на неорганическом вяжущем более трудоемок, а в зимнее время необходимо учитывать капиллярно-пористую структуру покрытия и риск водонасыщения, а также возможность химического взаимодействия реагентов с компонентами цементного камня [1]. Стоит принимать во внимание и перспективы изменения климатических характеристик [2]. Ожидается увеличение температур воздуха в летнее время. Высокие летние температуры несут риски коробления плит при их расширении.

С учетом использования участков существующей автомобильной дороги реконструкция подразумевает использование двух типов дорожной одежды. Первый тип устраивается на участках с новой дорожной одеждой и подразумевает следующую конструкцию: полотно иглопробивное текстильное ИГТс-ППВ-0-III-530; верхний слой земляного полотна из песчаного непылеватого грунта; технологический слой из щебеночно-песчаной смеси С6; слой из тощего бетона класса $B_{tb}1.2$ (В7,5 F100); слой из асфальтобетона песчаного горячего плотного типа Г марки I; цементобетонное покрытие из тяжелого бетона класс $B_{tb}4.4$ (В35, F150). Второй тип устраивается на участках с использованием существующей дорожной одежды и подразумевает следующую конструкцию: выравнивающий слой из пористого крупнозернистого асфальтобетона; слой из асфальтобетона песчаного горячего плотного типа Г марки I; цементобетонное покрытие из тяжелого бетона класс $B_{tb}4.4$ (В35, F150). Толщина покрытия в обоих случаях одинакова и составляет 24 см.

В принятую конструкцию можно внести несколько изменений:

– устраивать покрытие из разнопрочных бетонов двухслойным;

– модифицировать бетонную смесь дисперсным волокном.

Двухслойное покрытие из разнопрочных бетонов обладает следующими преимуществами [3]: возможность снижения стоимости за счет использования в нижней части покрытия бетона более низкой марки, перекрытие потенциального воздушного мешка над подгруженной арматурой слоем бетонной смеси, возможность устройства шероховатости по типу мытого бетона. Реализация технологии устройства двухслойного покрытия из разнопрочных бетонов возможна при использовании двух бетоноукладчиков одновременно. Данный аспект сдерживает широкое применение подобной технологии. Второй недостаток – низкая прочность на изгиб бетона, который укладывается в нижний слой покрытия. Эффективной мерой, направленной на повышение прочности на изгиб бетонных конструкций, является армирование. Однако применительно к строительству дорожных покрытий армирование металлической сеткой несет больше технологических и эксплуатационных сложностей, чем потенциальной выгоды.

Модификация бетонной смеси дисперсным волокном решает несколько задач и обеспечивает не только повышение прочности на изгиб, но и ударной прочности. Снижает риски образования сколов. При выборе вида армирующего волокна необходимо учитывать его природу, доступность и наличие достаточного количества научно-технической информации об его использовании на реальных объектах. В Республике Беларусь отсутствует достаточный объем информации об дисперсном армировании дорожных бетонов. За рубежом при строительстве бетонных покрытий часто используют низкомодульные волокна (например, полипропиленовое).

Для оценки затрат на строительство традиционного покрытия и дисперсно-армированного полипропиленовым волокном на участке реконструкции протяженностью 4 км составлены локальные сметы. Расчёты выполнены в ценах 2026 г. с учётом транспортных расходов и калькуляций на приготовление смеси. Стоимость строительства без дисперсного полипропиленового волокна

составляет приблизительно 5 700 000 руб. с дисперсным волокном – 6 200 000 руб (дороже 7,6 %). Дополнительные капитальные затраты компенсируются повышением эксплуатационных характеристик: ростом прочности на изгиб, ударной прочности в 3 раза, снижением трещинообразования и истираемости. Это приводит к увеличению межремонтных сроков и общего срока службы покрытия. Следует отметить, что существующие нормы проектирования не позволяют в полной мере обосновать технико-экономическую эффективность модификации материалов при устройстве дорожных одежд, так как не содержат прогнозных моделей, использующих большое количество переменных, и не предполагают моделирование работы конструкции [4].

Список литературы

1 **Молочко, Н. А.** Особенности содержания цементобетонных покрытий городских улиц и дорог / Н. А. Молочко // Наука – транспортной инфраструктуре : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, студентов и учащихся колледжей, Гомель, 21 марта 2024 г. – Гомель : БелГУТ, 2024. – С. 81–82.

2 **Смирнов, Н. Р.** Изменение климатических характеристик и их влияние на дорожную деятельность в Республике Беларусь / Н. Р. Смирнов // Наука – транспортной инфраструктуре : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, студентов и учащихся колледжей, Гомель, 21 марта 2025 г. – Гомель : БелГУТ, 2025. – С. 115–116.

3 **Рыжов, К. А.** Цементобетонные покрытия из разнопрочных бетонов / К. А. Рыжов // Молодежь и научно-технический прогресс : сб. докл. XVI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Губкин, 6 апр. 2023 г. В 2 т. – Губкин – Старый Оскол : Ассистент плюс, 2023. – С. 433–434.

4 **Балбуцкий, И. Г.** Проблемы проектирования нежестких и жестких дорожных одежд в условиях эксплуатации Республики Беларусь / И. Г. Балбуцкий, И. С. Дробот, Н. А. Молочко // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных : сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Омск, 10–11 февр. 2022 г. – Омск : СибАДИ, 2022. – С. 189–193.

УДК 625.76

ОСОБЕННОСТИ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА МЕСТНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

М. В. БУДЬКО
КУП «Гроднооблдорстрой», Республика Беларусь

Н. Н. ШКАБАРА
КУП «Минскоблдорстрой», Республика Беларусь

А. А. ЯНУЧОК
КПРСУП «Гомельоблдорстрой», Республика Беларусь

Большая протяженность сети местных автомобильных дорог, их техническое состояние и относительно ограниченные ресурсы, выделяемые на ремонт, вынуждают дорожников искать более совершенные подходы к управлению транспортно-эксплуатационными показателями местных дорог [1]. Возникает потребность в разработке новых стратегий или адаптации зарекомендовавших себя в других отраслях или странах (например, концепция бережливого производства). Концепция бережливого производства применительно к эксплуатации местных автомобильных дорог представляет собой системный подход к организации дорожно-строительных работ, ориентированный на минимизацию потерь (затрат) при одновременном повышении транспортно-эксплуатационных показателей (прочность, ровность и пр.). В рамках концепции выделяются характерные для дорожной отрасли потери, включая нерациональное применение ремонтного материала на участках дорог непостоянного народохозяйственного значения, нерациональную транспортировку и перемещения дорожно-строительной техники, простои бригад и нереализованный потенциал персонала. Организация работ базируется на принципах поточности технологических операций и вытягивающего планирования по готовности фронта работ и потребности в материалах с учетом сезонных и погодных ограничений, возможности широкого использования как материала существующих дорожных одежд, так и местных материалов, и техногенных отходов. Неотъемлемой составляющей является непрерывное совершенствование, предполагающее систематическое выявление и устранение потерь в технологических процессах. Существенное значение придается вовлечению инженеров, мастеров, рабочих развитию компетенций рабочих и инженерно-технических работников, а также формированию культуры постоянного улучшения, персональной ответственности за качество

работ. Эффективность концепции оценивается по показателям производительности, прочности и ровности покрытия, продолжительности работ, стоимости и безопасности, а также по снижению транспортных задержек и затрат пользователей. Бережливое производство в сфере ремонта автомобильных дорог можно рассматривать как интегральную управленческую модель, обеспечивающую устойчивое повышение эффективности производства за счет устранения потерь, оптимизации потоков ресурсов и постоянного совершенствования процессов.

Покрытия местных автомобильных дорог Беларуси устроены из асфальтобетона, цементобетона, щебеночных смесей и пр. На некоторых участках покрытия сильно изношены. Наблюдаются частые трещины и сетка трещин, деградация покрытия (рисунок 1). Дорожные одежды нуждаются в капитальном ремонте. Использование материала существующих дорожных одежд в качестве материала основания требует реализации комплекса конструкционно-технологических решений, направленных на повышение прочности или предупреждение копирования дефектов на устраиваемые защитные и несущие слои. Например, щебеночное покрытие может быть использовано в качестве основания при корректировке зернового состав и укреплении вяжущим с последующим устройством защитного слоя из тонкослойного асфальтобетона или поверхностной обработки.

Перекрытие трещиновато-блочного изношенного асфальтобетонного покрытия тонкими асфальтобетонными слоями неэффективно ввиду неизбежного копирования трещин на вновь устроенный слой в первые несколько лет эксплуатации после ремонта. Целесообразно восстановление сплошности методами холодной регенерации с последующим устройством защитного слоя из асфальтобетонной смеси. Дорожное хозяйство Беларуси на сегодняшний день не обладает достаточным количеством ресайклеров для повсеместного применения. При невозможности восстановления сплошности рационально использование трещинопрерывающих прослоек или технологии whitetopping [2].

а) *б*)

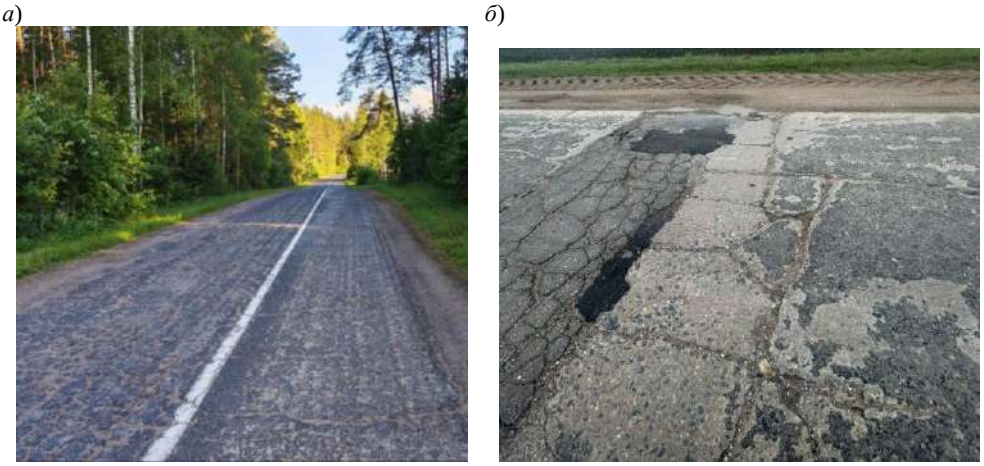


Рисунок 1 – Состояние изношенного асфальтобетонного (*а*) и цементобетонного (*б*) покрытий местных автомобильных дорог

Основная проблема при сочетании асфальто- и цементобетона в конструкциях дорожных одежд – это существенная разница в теплотехнических характеристиках, особенно в коэффициенте линейного расширения. Перекрытие существующего цементобетонного покрытия защитным слоем из асфальтобетона является трудной задачей. Сказывается разница в коэффициентах линейного расширения материалов – достаточно быстро появляются отраженные трещины [3]. Холодная регенерация для бетонных покрытий неприменима ввиду их высокой прочности и низких эксплуатационных качествах цементогранулята, который насыщается водой и интенсивно разрушается в основании дорожной одежды. Методы предупреждения отраженных трещин аналогичны используемым на асфальтобетонных покрытиях и включают прежде всего устройство трещинопрерывающих прослоек (мембранная технология). Снижение стоимости реализации мембранной технологии возможно за счет замены дорогостоящего модифицированного битума на продукт переработки кровельных битумосодержащих материалов [4].

Объективная оценка конкурентных вариантов и экономическое обоснование принимаемых решений должно основываться на механико-эмпирических методах проектирования, объединя-

ющих фундаментальные законы физики (механики) и данные, полученные опытным путем. Данные модели (например, Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) позволяют точно прогнозировать поведение конструкций и материалов под нагрузкой.

Список литературы

1 **Дудорга, В. А.** Проблема обеспечения требуемых транспортно-эксплуатационных характеристик покрытий сети местных дорог / В. А. Дудорга, И. С. Лохманков // Молодежь и научно-технический прогресс : сб. докл. XIII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых., Губкин, 9 апр. 2020 г. / сост.: Е. Н. Иванцова, В. М. Уваров [и др.]. В 2 т. Т. 1. – Старый Оскол : Белгород. гос. технол. ун-т им. В. Г. Шухова, 2020. – С. 232–234.

2 **Александров, Д. Ю.** О перспективе применения технологии WHITETOPPING при капитальном ремонте автомобильных дорог Республики Беларусь / Д. Ю. Александров, В. П. Бураков // Архитектура, строительство, транспорт : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (к 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ»), Омск, 2–3 дек. 2015 г. – Омск : Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)», 2015. – С. 8–12.

3 **Александров, Д. Ю.** Оптимальные сочетания в конструкциях дорожных одежд асфальто- и цементобетона / Д. Ю. Александров // Вести Автомобильно-дорожного института. – 2016. – № 2 (19). – С. 32–39.

4 **Царенков, А. А.** Основы технологии переработки кровельных битумосодержащих материалов для использования в дорожном строительстве / А. А. Царенков // Наука – транспортной инфраструктуре : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, студентов и учащихся колледжей, Гомель, 21 марта 2024 г. – Гомель : БелГУТ, 2024. – С. 127–128.

УДК 624.15

ОСОБЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ НА СЛАБОМ ОСНОВАНИИ

А. В. ВАЩЕНКО
ОАО «Буровая компания Дельта», Республика Беларусь

Развитие территорий невозможно без функционирования развитой дорожной сети. Особенности процессов формирования территорий, грунтовые и гидрогеологические условия определяют условия проложения автомобильной дороги. Труднодоступные участки территории могут располагать запасами полезных ископаемых. Например, Полесская низменность располагает запасами нефти, бурого угля (Житковичское, Бриневское и Тонежское месторождения), горючих сланцев (Любанское и Туровское месторождения), торфа, калийных и каменных солей (Старобинское и Петриковское месторождения), железных руд, давсонита (глинистой руды на алюминий), редкометального сырья, доломитов, мела, мергеля, тугоплавких и кирпичных глин, а также формовочных и стекольных песков. Теоретически в недрах Белорусского Полесья могут быть обнаружены практически все основные классы полезных ископаемых – от топливно-энергетических до агрохимических и строительных. При этом такие препятствия как постоянные водотоки и заболоченные участки вынуждают инженеров-проектировщиков при проектировании автомо-бильных дорог разрабатывать индивидуальные конструкции искусственных сооружений или использовать специальные конструкционно-технологические решения, позволяющие обеспечить надежность и долговечность земляного плотна на слабом основании.

Земляное полотно как элемент дорожной конструкции на слабом основании (болотные массы, обводненные пески низкой прочности и пр.) в большей степени влияет на транспортно-эксплуатационные качества автомобильной дороги [1]. Просадки и деформации, вызванные давлением массы грунта земляного полотна на слабое основание, приводят к ухудшению ровности покрытия и развитию трещин, что в свою очередь вызывает снижение проточности и рост дефектности вследствие динамических ударов колеса автомобиля о неровности.

Традиционными способами предотвращения деформирования насыпей автомобильных дорог, проходящих по заболоченным участком, являются полное или частичное выторфовывание, устройство песчаных свай или прорезей, устройство плавающей насыпи. Приведенные традиционные методы в условиях ограниченных сроков, значительной глубины залегания слабых слоев и строгих экологических норм часто оказываются экономически неэффективными или технически нереализуемыми.

В различных регионах мира со схожими проблемами, возникающими при строительстве автомобильных дорог в болотистой местности, инженеры стремятся создать прочное свайное основание под насыпью, аналогичное свайному полу под опорой моста или зданием. Например, исследователи из стран Азии предлагают применение грунтоцементных свай (колонн), создаваемых

с помощью технологий глубинного смешивания грунта [2] с цементным раствором (Jet Grouting / Deep Soil Mixing) или грунтовых свай в геосинтетических оболочках [3], которые сдерживают боковое расширение материала, за счет чего вертикальная несущая способность сваи вырастает в несколько раз.

Белорусские же строители на объекте, расположенном в Северо-Западном федеральном округе Российской Федерации, реализовали инновационную технологию устройства буронабивных свай DDS. Данный метод раскатки грунта (без выемки шлама) позволил не только создать жесткое свайное основание, но и дополнительно уплотнить окружающий массив грунта, что способствовало обеспечению стабильности дорожной насыпи, минимизации осадок и увеличению межремонтных сроков эксплуатации. Сокращение технологических циклов (благодаря отказу от выемки и транспортировки грунта) обеспечило высокую скорость возведения земляного полотна.

Буронабивные сваи DDS могут армироваться или устраиваться без армирования. Объединяет сваи в единую конструкцию гибкий или жесткий ростверк. Гибкий ростверк представляет собой многослойную конструкцию из полуобойм геосинтетического материала, заполненных строительным песком. Толщина полуобоймы составляет 20 см. Количество слоев зависит от высоты насыпи и физико-механических характеристик укрепляемых грунтов (рисунок 1).

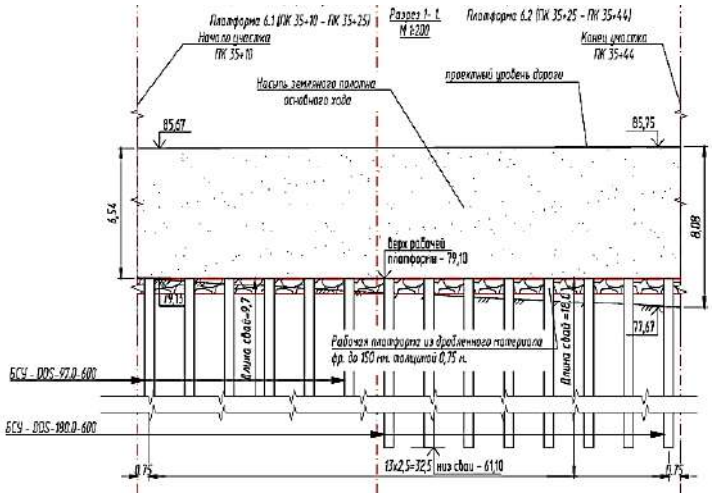


Рисунок 1 – Фрагмент продольного профиля участка автомобильной дороги на слабом основании, устроенного на свайном поле с гибким ростверком

Жесткий ростверк целесообразен на участках с дополнительной нагрузкой на слабый грунт. Например, необходимость устройства водопропускной трубы вызывает потребность в устройстве жесткого основания из железобетона толщиной 40 см (рисунок 2).

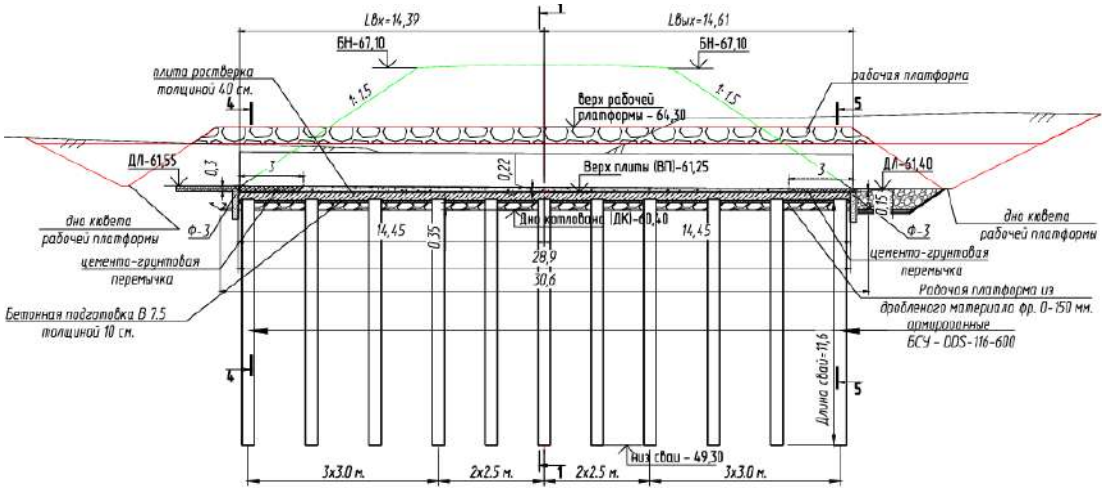


Рисунок 2 – Поперечный профиль участка автомобильной дороги на слабом основании, устроенного на свайном поле с жестким ростверком

Плита ростверка изготавливается из бетона класса В15 морозостойкости F100 и водонепроницаемости W4. Заделка свай DDS в плиту ростверка – жесткая. Данная заделка достигается при помощи заведения тела свай DDS в тело ростверка на 5 см и введение армирования в сваи DDS, расположенные под плитой ростверка.

Список литературы

1 **Рыжов, К. А.** Проблемы обеспечения надежности и долговечности земляного полотна автомобильных дорог / К. А. Рыжов, И. А. Томчук // Молодежь и научно-технический прогресс : сб. докл. XV Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Губкин, 7 апр. 2022 года / сост.: Е. Н. Иванцова, В. М. Уваров [и др.]. В 2 т. Т. 1. – Губкин : Белгород. гос. технолог. ун-т им. В. Г. Шухова, 2022. – С. 277–279.

2 **Ле Суан Тхо.** Обеспечение стабильности слабых основании дорожных насыпей с помощью грунтоцементных свай : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.23.11/ Ле Суан Тхо. – Москва, 2011. – 22 с.

3 **До Кхань Хунг.** Усиление слабых оснований дорожных насыпей грунтовыми сваями в геосинтетических оболочках : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.23.11 / До Кхань Хунг. – Москва, 2014. – 22 с.

УДК 625.171:625.175

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВНЕДРЕНИЮ НА ПОЛИГОНЕ ГОРЬКОВСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОЛЕВЫХ РАБОТ ПО БОРЬБЕ С НЕЖЕЛАТЕЛЬНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

Р. Р. ГАРАЕВ
Горьковская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

А. В. СЕМЕНЮК
Нижегородский институт путей сообщений – филиал Приволжского государственного университета путей сообщения, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Горьковская железная дорога проходит по территории 15 субъектов Российской Федерации, среди которых 6 республик: Мордовия, Чувашия, Удмуртия, Татарстан, Марий Эл, Башкортостан, 8 областей: Московская, Владимирская, Нижегородская, Кировская, Свердловская, Вологодская, Рязанская, Ульяновская, а также по территории Пермского края. Она минует 205 административно-территориальных районов, где проживает более 14 миллионов человек, проходя по территориям, где сосредоточены не только промышленные предприятия, но и большие площади, занятые в сельском хозяйстве, как большие фермерские хозяйства, так и мелкие частные подворья. Указанные земли пребывают в разной степени освоения, встречаются и заброшенные участки, и предприятия в стадии смены собственника, банкротства, а также труднодоступные участки, находящиеся в сложных по рельефу условиях (пойменные, болотистые участки и т. д.). Данные участки граничащие с территориями прохождения Горьковской магистрали, являются потенциально опасными по зоне распространения опасных растений.

По территориям пролегания Горьковской железной дороги отмечено наличие более 19 видов опасных сорняковых растений, наиболее узнаваемые из них – это мак снотворный, конопля, борщевик Сосновского, золотарник канадский. Все они представляют как прямую, так и косвенную угрозу для бригад, проводящих обслуживание и содержание объектов инфраструктуры железной дороги. Также не исключён случайный контакт с растениями (семенами, соком и т. п.) самих пассажиров (домашних животных) и их личных вещей.

Одной из проблем при проведении работ по обслуживанию и содержанию железнодорожного пути являются вредоносные и опасные растения, которые создают проблемы как для работников соответствующих структурных подразделений и дирекций, так и для обеспечения комфорта и безопасности пассажиров и жителей, граничащих с полосой отвода железной дороги.

Условно данную проблему можно разделить на две группы.

Первая группа – это прорастание нежелательной растительности на ж.-д. путях (балластной призме, разделительном слое, основной площадке земляного полотна, а также непосредственно в теле земляного полотна и водоотводных сооружениях). Это приводит к следующему:

– нарушаются несущие и дренирующие свойства земляного полотна и водоотводов;

– создаются реальные помехи для применения машин по глубокой очистке балласта;

– при применении средств диагностики и мониторинга железнодорожного полотна искажаются данные, получаемые с датчиков (к примеру, лазерного сканирования габаритов приближения строения либо габаритов подвижного состава);

– ухудшается видимость сигналов и габаритных огней;

– ухудшается видимость при густой вьющейся растительности (к примеру, вьюнок полевой) потенциально опасных дефектов (трещины отрывов земляного полотна, подтопление «подхода» к ж.-д. путям и т. д.).

Все это в совокупности напрямую влияет на безопасность движения.

Ко *второй группе* можно отнести вредоносные и опасные растения в полосе отвода, которые создают следующие проблемы:

– высокие деревья и сухостой создают угрозу падения на железнодорожный путь, линии электропередачи или другие инфраструктурные объекты;

– сильные заросли влаголюбивых растений могут мешать зондированию почвы и балласта, что при засорителях балласта по контакту с глинистыми грунтами ведёт к появлению выплесков, при застоях воды у основания земляного полотна – к переходу грунтов с тугопластичного (стабильного) состояния в текучее летом либо развитию пучин в период отрицательных температур;

– нарушение работы водоотводных сооружений (кюветов, лотков) особенно опасно при увеличении площади водосбора (застоя) воды с верховой стороны от ж.-д пути;

– повышенная пожаропасность (сухостой и т. д.);

– отдельно нужно отметить наличие вредоносных и опасных растений (белена, дурман, конопля, борщевик и т. д.), которые создают угрозу здоровью работников даже при случайном контакте.

В настоящее время наиболее распространённый способ борьбы с этими опасными растениями – их механическое уничтожение или специальными бригадами, или с применением техники [1]:

– при этом для работников бригад, задействованных для проведения этих работ, в соответствии с требованиями норм охраны труда необходима специальная экипировка: плотный водоотталкивающий костюм, резиновые сапоги, защитные очки (маска-щиток всего лица) и перчатки. После выкашивания данный костюм требует полной химической обработки (либо утилизации);

– применение специализированной или землеройной техники достаточно дорогостоящий метод и не всегда применим ввиду отсутствия подъездов, возможного наличия стеснённых условий, наличия слабых грунтов, пересечённого рельефа, зон подтопления и т. д.

Более прогрессивный метод борьбы с опасными растениями, доказавший свою эффективность по сравнению с механическим, это химический метод [2]. Применяются специальные гербициды на основе глифосата, действующие на корневую систему растения, но ввиду того, что люди находятся в непосредственной близости и контактируют как с растением, так и с опасными химическими веществами, этот метод является опасным и предъявляет требования к уровню квалификации персонала, имеются трудности при одновременной обработке больших площадей.

Учитывая недостатки указанных методов и привлечение большого числа работников ж.-д. транспорта при их реализации, предлагается новый инновационный для Горьковской железной дороги метод с применением БПЛА, включающий в себя преимущества механического метода борьбы в комплексе с химическими веществами по безлюдной технологии и исключающий (минимизирующий) опасное воздействия на человека.

1 **Предлагаемая технологическая схема по применению БПЛА для борьбы с нежелательной растительностью в период проведения капитального ремонта пути по безлюдной технологии**

Нижегородский институт путей сообщений (НИПС) совместно с Горьковской дирекцией инфраструктуры рассмотрели возможность применения БПЛА на фронте капитального ремонта пути на конкретном участке [3].

1.1 **Первый этап – сбор информации для разработки проекта и производства работ на конкретном участке пути**

Техническая характеристика участка производства работ: *однопутный перегон Разъезд 296 км – Зимёнки, с 297 км по 303 км направления Нижний Новгород – Арзамас.*

По данному однопутному участку существующая грузонапряжённость на участке ремонта:

– в пассажирском движении составляет 4,6 млн т·км брутто;

– в грузовом движении составляет 23,8 млн т брутто.

На данном этапе собирается вся доступная информация об участке производства работ включая открытые источники, архивные материалы и цифровые данные с информационных систем, в том числе: расположение участка; какой дистанцией пути обслуживается; наличие элементов и объектов инфраструктуры и т. д.

Кроме этого особое внимание уделяется таким сведениям, как климатическая, географическая и инженерно-геологическая характеристика района, на территории которого находится участок для производства работ.

В результате проведенного анализа всей исходной информации было установлено следующее:

– участок расположен в Богородском районе Нижегородской области (рисунок 1);

– обслуживается Лукояновской дистанцией пути (ПЧ-30) Горьковской дирекции инфраструктуры;

– пересечения с автодорогой (ж.-д. переезд), технические проезды и автодороги, идущие параллельно ж.-д. пути, в границе полосы отвода отсутствуют;

– искусственные сооружения представлены водопропускными трубами;

– водоотводные сооружения в основном представлены грунтовыми канавами, кюветами в неудовлетворительном состоянии;

– путь электрифицирован, вдоль пути опоры контактной сети и продольные ж.-д. пути линии электропередач (ЛЭП);

– плотность надземных и подземных коммуникаций различная;

– климат района, где находится участок производства работ, умеренно континентальный, с продолжительной умеренно холодной зимой и коротким, но сравнительно тёплым летом с 60 днями (в среднем) переходов температуры воздуха через 0 °С;

– рельеф на участке относительно спланированный;

– максимальная отметка на участке работ 173,77 м, минимальная – 108,38 м;

– в геоморфологическом отношении данный участок расположен на первой надпойменной террасе р. Оки, представляющей замкнутую аккумулятивную равнину, частично занятую озерами, заболоченными участками, включая старицы.

Выполнение ремонтных работ производится по существующей трассе I главного пути (рисунок 1).

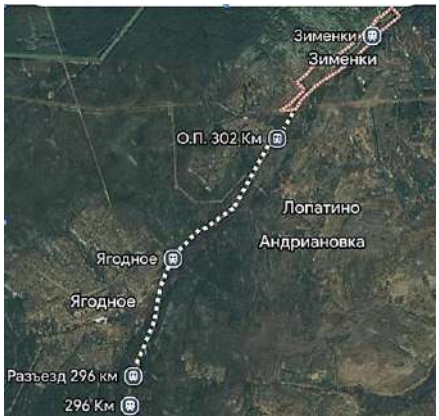


Рисунок 1 – Маршрут прохождения линейного объекта и участка капитального ремонта

1.2 **Проблемные вопросы на рассматриваемом участке производства работ**

Проведенный анализ исходных данных по участку производства работ позволил определить проблемные вопросы, оказывающие влияние на сроки и методы проведения работ. В том числе:

– высокий уровень грунтовых вод, в период проведения обследования он зафиксирован на глубине от 0,20 до 3,80 м;

– водоносный горизонт безнапорный, порового типа – питание его происходит за счёт инфильтрации атмосферных осадков и в период подъёма уровня поверхностных вод; разгрузка происходит в местную речную сеть и в большой степени за счёт испарения;

– сезонное естественное подтопление вследствие образования горизонта подземных вод типа «верховодка», при подтоплении наблюдается преимущественно естественно-техногенный тип режима подземных вод;

– территория относится к сезонно подтопляемой;

– при сухом жарком лете из-за наличия густой растительности (переходящей в сухостой, «сено») имеется вероятность возникновения локальных очагов возгорания;

– верхний почвенно-растительный покрывной выходящий на дневную поверхность слой «загрязнён» нежелательной растительностью.

Также были проведены исследования физико-механических свойств грунтов с учётом возраста, генезиса грунтов и фондовых данных, в результате чего в геологическом разрезе площадки выделены следующие литологические слои и инженерно-геологические элементы (ИГЭ) сверху вглубь [4]:

– ИГЭ-1 – балласт щебёночный, слагает балластную призму железнодорожного пути (*загрязнен до 30 %, есть следы почвенно-растительного слоя (описано выше)*);

– ИГЭ-2 – асбестовая крошка – слой залегает под щебнем в основании балластной призмы.

Грунты земляного полотна:

– ИГЭ-3 – насыпной грунт: песчано-гравийная смесь, маловлажная. Мощность от 0,10 до 0,62 м;

– ИГЭ-4 – насыпной грунт: песок средней крупности серовато-коричневого цвета, с включением гравия и гальки до 10 %, средней плотности, влажный. Мощность от 0,10 до 3,4 м.

Грунты основания:

– ИГЭ-5 – песок средней крупности серовато-коричневого цвета, с включениями гравия и гальки до 15 %, средней плотности, влажный, ниже уровня грунтовых вод – водонасыщенный. Песок расположен локально, вскрытая мощность изменяется от 0,80 до 7,4 м;



Рисунок 2 – Территория участка производства работ

– ИГЭ-6 – глина лёгкая пылеватая коричневого и серого цветов, с включениями гравия и гальки до 15 %, с прослоями песка мелкого водонасыщенного. Грунт полутвёрдой консистенции. Слой распространён практически повсеместно, вскрытая мощность изменяется от 0,15 до 3,95 м.

Водовмещающие породы представлены песками (ИГЭ-5) и песчаными прослоями в глине (ИГЭ-6).

Вдоль ж.-д. линии разветвлена сеть малых ручьев со старицами и болотистыми участками (рисунок 2) с минимальными уклонами, что способствует застою воды в полосе отвода ж.-д. пути (рисунок 3).

Кроме этого в полосе отвода наблюдаются значительные площади (от 10 до 15 %) зарослей вредоносной растительности, в том числе опасного борщевика Сосновского (рисунок 4), ведётся постоянный выкос силами ПЧ-30, однако ввиду того что полоса отвода граничит как с садовыми товариществами, так и с заброшенными землями, ежегодно наблюдается повторное зарастание вредоносным сорняком.

Таким образом, проектом капитального ремонта [5] на данном участке предусматривается установка максимальной скорости движения пассажирских поездов до 100 км/ч.

Перечень проводимых работ:

– полная замена рельсошпальной решётки на новых материалах т. е. капитальный ремонт 1-го уровня (КРН);

– замена балласта с приведением балластной призмы к нормативному очертанию, с толщиной балласта под шпалой не менее 40 см, плечо балластной призмы 45 см, крутизна откосов 1:1,5.

Параметры земляного полотна в данном проекте:

– основная площадка земляного полотна не менее 5,5 м;

– обеспечение требуемой обочины не менее 0,5 м, не более 1,1 м;

– крутизна откосов для насыпей высотой до 6,0 м принята 1:1,5 для насыпи высотой от 6 до 12 м принята 1:1,75.

На участке производства работ земляное полотно представлено насыпями, выемками и нулевыми местами.


Рисунок 3 – Общий вид производства работ по приведению полосы отвода к проектным решениям (апрель 2026 г.)

Для повышения прочности и устойчивости земляного полотна:

– обустраиваются обочины на всём протяжении участка;

– расстояние от оси пути до бровки земляного полотна принято 3,8 м на прямых участках и с уширением земляного полотна на кривых участках пути с наружной стороны согласно СП 119.13330.2024;

– срезка балластных шлейфов старых лет, а также срезка и досыпка откосов насыпи с обеспечением крутизны откосов земляного полотна 1:1,5;

– восстановление, ремонт и очистка водоотводных устройств, а также устройство (нарезка вновь) заиленных водоотводов, замена дефектных ж.-б. лотков;

– укрепление канав и кюветов, откосов насыпи земляного полотна посевом семян быстровсхожими многолетними травами (травосеяние после срезки).



Рисунок 4 – Борщевик Сосновского в полосе отвода

Работы по ремонту земляного полотна призводятся в соответствии с требованиями СП «Земляные сооружения, основания и фундаменты» (СП 45.13330.2017).

2 **Второй этап производства работ по капитальному ремонту рассматриваемого участка работ**

2.1 **Порядок применения дронов-опрыскивателей для точечного распыления средств борьбы с нежелательной растительностью**

С учетом проведенного анализа, согласно проекту рассматривается совместное выполнение работ по капитальному ремонту верхнего строения пути, с приведением полосы отвода железнодорожного пути к нормативным очертаниям и восстановлением грунтовых водоотводных сооружений автотракторной землеройной техникой, а также применением БПЛА для посева скоровсходящей газонной растительности (посев многолетних трав).

Использование БПЛА в сельском хозяйстве принимает повсеместный характер и не является чем-то новым или исключительным, но в данном конкретном примере производства работ предлагаемая модель предполагает привлечение для точечного распыления ремонтируемого участка агродронов с полезной нагрузкой до 25 кг [6].

Такая схема применения БПЛА обладает рядом преимуществ:

1 Ведение комплексной разведки с возможностью привлечения как БПЛА, так и диагностического оборудования позволяет определить как повреждения объектов инфраструктуры, так и наличие вредоносных и опасных растений в полосе отвода (в границах участка проведения ремонтных работ). При этом материальные затраты при проведении комплексной разведки минимальны, так как всё необходимое оборудование, включая БПЛА, уже имеется на балансе структурных подразделений.

2 Так как при производстве указанных работ мы получили геодезические координаты километровых знаков, опор контактной сети и других объектов железнодорожной инфраструктуры, созданные цифровые карты могут применяться для пролёта агродрона и точечного распыления средств борьбы с нежелательной растительностью (гербициды и т. п.).

3 По заранее построенному заданию современные агродроны позволяют производить опрыскивание с высоты в 2–3 метра, что значительно сокращает расход химических растворов по борьбе с нежелательной растительностью (5–25 литров рабочего раствора на гектар вместо 100 литров при наземном опрыскивании (бригадой с ручным оборудованием).

4 За счет применения агродронов получается значительное сокращение времени на обработку зараженных вредоносными растениями площадей: рабочий темп – до 10 гектаров в час (в зависимости от применяемой модели БПЛА).

5 Управление БПЛА, производящим разведку участка работ, и агродроном, производящим распыление, осуществляется одним оператором. Доставка к месту работ осуществляется любым транспортным средством или легковым автомобилем.

При проведении работ по предлагаемой схеме необходимо учитывать следующие факторы:

1 Погодные условия. Оптимальные условия для опрыскивания: воздух в диапазоне от 12 до 25 °С (включая ночной период после обработки), влажность – около 75 %, скорость ветра (желательно не более 5 м/с). В летний период при температуре воздуха более 25 °С производить работы с 19 часов вечера до 9 утра. Если смесь составная (к примеру, разбавляемый порошок или концен-

трат), её необходимо приготовить непосредственно перед полётом из расчёта от обрабатываемой площади (в ёмкость БПЛА вливается уже готовый к применению раствор, не концентрат).

2 Непосредственно перед первым полётом над участком капитального ремонта пути, с навесной нагрузкой, необходимо вручную провести картирование агродроном с подключенной базовой станцией RTK. Оператор сможет повторно измерить поле и задать его реальные границы. Это важно для исключения погрешности. При полете с погрешностью в 3–5 метров БПЛА может, например, врезаться в здание или дерево либо вылететь за пределы полосы отвода на частную либо природоохранную территорию.

3 **Третий этап – применение агродронов для посева семян растительности для подавления вредоносных культур при завершающих работах по приведению полосы отвода к проектным очертаниям**

На рассматриваемом участке посев семян с БПЛА производился в весенний период при завершающих работах по приведению полосы отвода к проектным очертаниям. В указанный период отсутствовала возможность захода на участок техники на автомобильном ходу и специальных бригад ввиду весеннего обводнения территории.

3.1 **Достигаемые цели при внедрении рассматриваемой технологической схемы:** оперативная цифровая диагностика и постоянный мониторинг железнодорожного пути, выявление опасных растений и формирование цифровых карт, отображающих информацию в реальном времени (либо с заданной периодичностью).

Ключевые задачи в предлагаемом проекте для ж.-д. инфраструктуры и полосы отвода:

– объективность обследования всей инфраструктуры при проведении одного выезда, возможность удалённого мониторинга;

– достоверность получаемой информации, её оперативный анализ и дальнейшее применение;

– оперативность предоставления данных с построением актуальной цифровой модели;

– вывод персонала от отрицательного воздействия окружающей среды, применение безлюдной технологии при производстве работ;

– возможность дальнейшего мониторинга с заданной периодичностью;

– принятие экономически оправданного командного решения на основе данных, полученных цифровым оборудованием, подтверждённых перекрёстной проверкой (БПЛА, ДК).

До внедрения разрабатываемого проекта могут быть задействованы одновременно три бригады [7]:

– текущее содержание, ремонт и очистка путей (включая окос ПК и КМ знаков) производится путевой бригадой ПЧ-30;

– текущее содержание, вырубка растительности, ремонт и очистка водоотводов и полосы отвода производится бригадой по содержанию земляного полотна ПЧ-30;

– текущее содержание, ремонт и очистка искусственных сооружений производится бригадой ПЧ ИССО.

Итого в среднем минимальный состав каждой бригады с учётом руководителя и сигналистов составляет 6 человек, т. е. $6 \cdot 3 = 18$ чел. При тёплом и дождливом лете откос растительности может иметь интенсивную периодичность, что влечёт частое отвлечение персонала. При проверке надзорных органов возможны штрафные санкции. Также возможны репутационные риски и влияние на здоровье граждан.

После внедрения дополнительный положительный эффект без учёта достигнутых целей следующий: значительное сокращение времени, сил, средств, отвлечения персонала при борьбе с нежелательной растительностью; вывод персонала из-под отрицательного воздействия окружающей среды, применение безлюдной технологии при производстве работ

Заключение. Таким образом, представленное в статье решение применения БПЛА при использовании в едином комплексе с современными диагностическими комплексами на железнодорожном ходу значительно уменьшает затрачиваемое время на мониторинг ж.-д. инфраструктуры для выявления потенциально опасных очагов и площади распространения нежелательной растительности, что позволяет оперативно определить необходимый объём работ.

В итоге сокращается время передачи достоверной и объективной информации по сравнению с существующей системой визуальных осмотров и другими не цифровыми методами с применением, к примеру, оптического или фото-, видеооборудования.

Полученные результаты являются обоснованием для проектных решений при ремонтах ВСП, а также для оперативной работы бригад при текущем содержании железнодорожной инфраструктуры.

Список литературы

1 Об утверждении Правил по охране труда, экологической, промышленной и пожарной безопасности при техническом обслуживании и ремонте объектов инфраструктуры путевого комплекса ОАО «РЖД» (вместе с ПОТ РЖД-4100612-ЦП-ЦДРП-022-2013. Правила ...) : распоряжение ОАО «РЖД» от 4 февр. 2014 № 255Р (ред. от 30.12.2021) // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 23.09.2026).

2 Об утверждении Правил по охране труда при техническом обслуживании и ремонте объектов инфраструктуры путевого комплекса ОАО «РЖД» (вместе с ПОТ РЖД-4100612-ЦДИ-ЦДРП-022-2022. Правила...) : распоряжение ОАО «РЖД» от 08.04.2022 № 953/р // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 23.09.2026).

3 Правила назначения ремонтов железнодорожного пути : утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 2888/р от 17 дек. 2021 г. // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 23.09.2026).

4 СП 11-104-97 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства». – Введ. 01.01.1998. // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 23.09.2026).

5 ГОСТ Р 21.101-2020 Система проектной документации для строительства. Основные требо-вания к проектной и рабочей документации. – Взамен ГОСТ 21.1103–2013 ; введ. 01.01.2021 // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 23.09.2026).

6 Об установлении экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций и утверждении Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по эксплуатации сельско-хозяйственных беспилотных авиационных систем : постановление Правительства РФ от 16 сент. 2023 г. № 1510 // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 23.09.2026).

7 Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути : утв. распоряжением № 2288р от 14 нояб. 2017 г. // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 23.09.2026).

УДК 004.8:629.4

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВЫХ НАКЛАДОК ПРИ СОЧЕТАННЫХ СТАНДАРТНЫХ НАГРУЗКАХ

М. Г. ГЕГЕДЕШ
Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

Н. В. КОМАРОВСКИЙ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

А. И. СТОЛЯРОВ
Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

Рельсовые накладки относятся к элементам верхнего строения пути и обеспечивают соединение рельсов и передачу продольных усилий. В процессе эксплуатации накладка воспринимает сложный спектр нагрузок: вертикальное давление от колёс подвижного состава, продольные растягивающие усилия, возникающие вследствие температурных деформаций рельсов бесстыкового пути, а также динамические составляющие, обусловленные неровностями пути и подвижного состава. Существующие нормативные документы, в частности ГОСТ 33184-2014 [1], регламентируют технические требования к накладкам, но не устанавливают требований к совместному приложению нагрузок при испытаниях. В реальных условиях эксплуатации эти нагрузки действуют одновременно, что может приводить к перераспределению полей напряжений и изменению характера деформирования конструкции.

Целью настоящей работы является анализ напряжённо-деформированного состояния рельсовых накладок при сочетанном действии стандартных нагрузок и сопоставление полученных результатов с данными, соответствующими раздельному приложению этих нагрузок.

В эксплуатации накладка работает в условиях одновременного действия вертикальной нагрузки от колеса, продольного растягивающего усилия от температурных деформаций, динамических составляющих и усилий затяжки болтов. Совместное действие этих факторов определяет сложное напряженно-деформированное состояние (далее – НДС) накладки, которое может быть адекватно проанализировано только с помощью специальных инженерных программных комплексов. В представленной работе для проведения компьютерных экспериментов использован программный комплекс ANSYS.

Для оценки НДС рельсовой накладки разработана конечно-элементная модель, представленная на рисунке 1, *а*. Модель воспроизводит геометрию накладки с учётом болтовых отверстий, переходных радиусов и контактных поверхностей. Дискретизация выполнена с локальным сгущением

сетки в наиболее нагруженных зонах, что обеспечивает необходимую точность расчёта эквивалентных напряжений по Мизесу. Материал накладки конструкционная сталь с модулем упругости $E = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0{,}3$. Предел текучести материала составляет $\sigma_т = 350$ МПа, предел прочности $\sigma_в = 550$ МПа.

Граничные условия соответствуют условиям работы накладки в составе рельсового скрепления. Торцевые поверхности закреплены от продольных перемещений, контакт с рельсом моделируется контактными элементами с односторонней связью. Усилие затяжки болтов учитывалось путём приложения эквивалентных сосредоточенных сил к поверхностям отверстий.

Расчёт выполнен в геометрически нелинейной постановке с учётом больших перемещений, поскольку при сочетанном нагружении деформации в зоне болтовых отверстий достигают величин, при которых линейная теория даёт заметную погрешность.

Схема нагружения статической вертикальной нагрузкой и растягивающим усилием приведена на рисунке 1, *б*. Вертикальная нагрузка $P = 350$ кН прикладывается в средней части накладки, растягивающее усилие $S = 800$ кН по торцам. Схема нагружения циклической вертикальной нагрузкой и растягивающим усилием приведена на рисунке 1, *в*. Здесь $P_{max} = 245$ кН, $P_{min} = 175$ кН, что соответствует коэффициенту асимметрии цикла $R = 0{,}71$. Растягивающее усилие при циклическом нагружении принималось постоянным по величине и равным 800 кН.

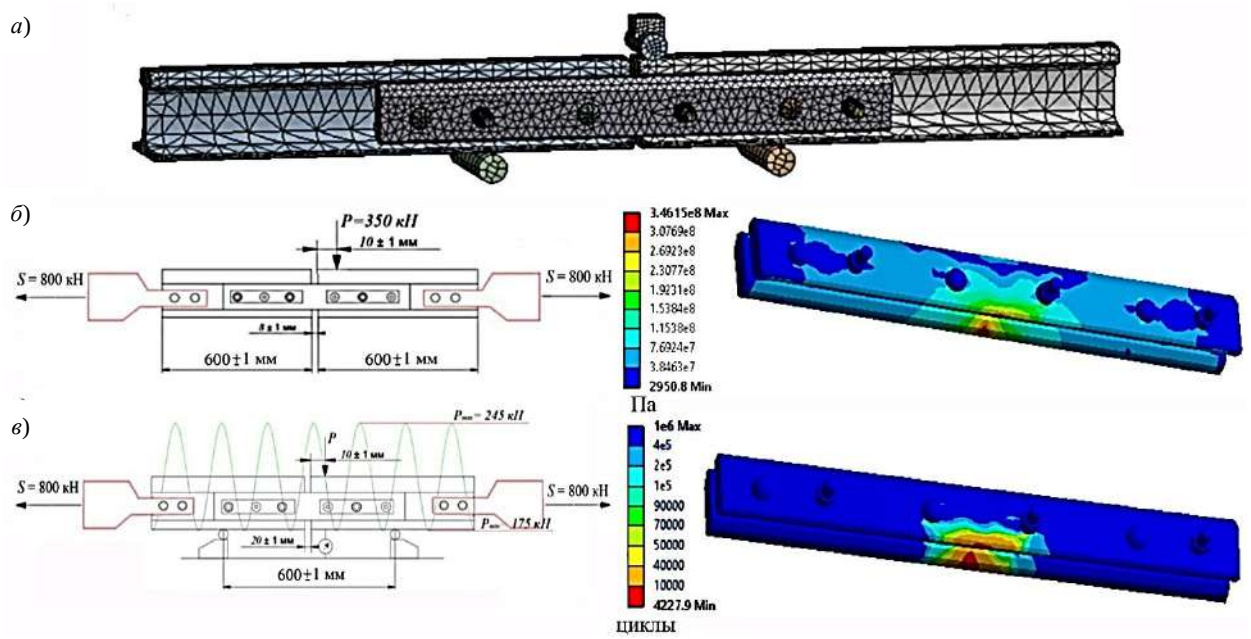


Рисунок 1 – Конечноэлементная модель (*а*), схемы нагружения и соответствующие результаты расчетов (*б*, *в*)

Полученные результаты анализа НДС показывают, что при сочетанном нагружении статической вертикальной нагрузкой и растягивающим усилием максимальные эквивалентные напряжения составляют 446,9 МПа, что в 1,30 раза превышает значение при чисто вертикальном нагружении (343,2 МПа) и в 2,73 раза при чисто растягивающем (163,7 МПа).

По деформациям картина аналогична: при сочетанном нагружении максимальное перемещение составляет 1,24 мм, что в 1,12 раза превышает значение при чисто вертикальном нагружении (1,11 мм) и в 2,76 раза при чисто растягивающем (0,45 мм).

Таким образом, отношения значений, полученных при сочетанных нагрузках, к значениям при стандартных нагружениях составляют: по напряжениям 1,30 (относительно вертикальной нагрузки) и 2,73 (относительно растягивающей); по деформациям 1,12 и 2,76 соответственно.

Отдельного внимания заслуживает анализ усталостной долговечности. При чисто циклическом вертикальном нагружении накладка выдерживает 11115 циклов. При сочетании циклической вертикальной нагрузки с постоянным растягивающим усилием долговечность снижается до 4227 циклов, т. е. в 2,63 раза.

Полученный результат свидетельствует о том, что растягивающее усилие, само по себе не являющееся определяющим для статической прочности, при циклическом нагружении играет роль фактора, существенно ускоряющего накопление усталостных повреждений, что согласуется с данными натурных испытаний накладок, приведёнными в работе [2], где усталостная долговечность соединений в значительной степени зависела от уровня статической составляющей нагружения.

Список литературы

1 ГОСТ 33184-2014. Накладки рельсовые двухголовые для железных дорог широкой колеи. Технические условия. – Введ. 01.07.2015. – М. : Стандартинформ, 2015. – 12 с.

2 **Бирюков, Д. С.** Экспериментальные исследования усталостной долговечности стыковых соединений железнодорожного пути / Д. С. Бирюков, М. Ю. Иванов // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – № 5. – С. 28–33.

УДК 625.768.5

СНЕГОЗАЩИТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СЕТОК НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ

О. В. ГЛАДЫШЕВА, Е. А. БОНЧЕВА, Е. В. МИРОНОВА, А. Р. ОГАНЕСЯН
Воронежский государственный технический университет, Российская Федерация

Снежные заносы на дорогах, образующиеся после прохождения метелей, существенно снижают безопасность движения. Для защиты дорог от снега в соответствии с действующими нормативными документами используются лесополосы, а также снегозадерживающие щиты и заборы, которые представляют собой деревянные конструкции. В настоящее время большой интерес для конструирования снегозащитных сооружений представляют полимерные сетки, которые возможно использовать для проектирования постоянной снегозащиты [1]. Для определения условий возможного использования таких сооружений для снегозащиты проведено исследование снегозадерживающей способности заборов из сеток на полимерной основе.

В исследовании рассматривалась снегозадерживающая конструкция высотой 3,0 м. Конструкция предусматривает двухпанельное крепление сетки с зазором между панелями величиной 0,15 м. Нижняя панель имеет ширину 1,7 м, а верхняя 0,85 м. Моделирование работы такой конструкции во время прохождения метели проведено для оценки влияния зазора между панелями на снегосборную способность защиты и определения снегозадерживающей способности. Просветность исследуемой полимерной сетки составляет 50 %. В программном комплексе FlowVision выполнено моделирование работы сооружения на основе применения системы уравнений Навье – Стокса, описывающей движение вязкой несжимаемой жидкости [2–4].

Схема двухпанельной снегозадерживающей конструкции и ее геометрическая модель приведены на рисунке 1.

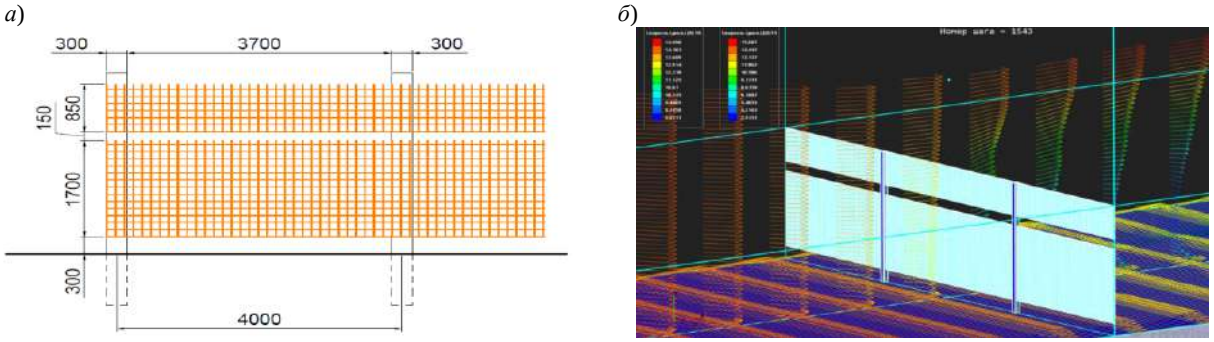


Рисунок 1 – Двухпанельный снегозадерживающий забор из полимерных сеток:
а – схема двухпанельной снегозадерживающей конструкции; *б* – общий вид геометрической модели двухпанельного снегозадерживающего забора, загруженной в программный комплекс «FlowVision»

Результаты моделирования представлены в виде эпюр распределения скорости снеговетрового потока на рисунке 2.

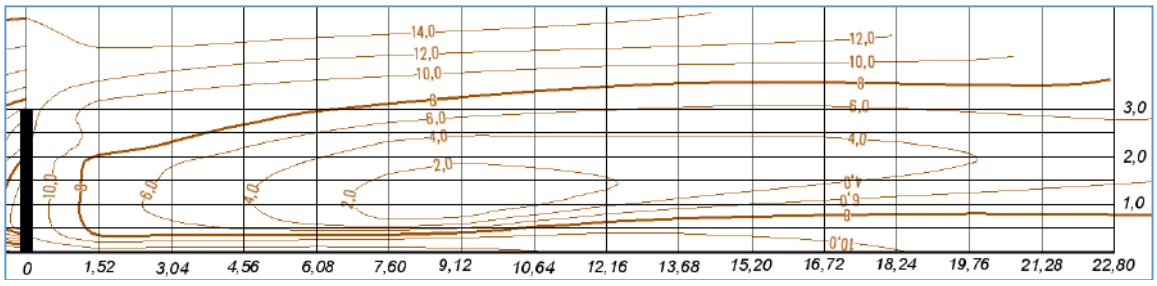


Рисунок 2 – Распределение скорости снеговетрового потока
у двухпанельной снегозадерживающей конструкции высотой 3,0 м с просветностью 50 %

Анализ распределения скоростей снеговетрового потока за снегозадерживающей конструкцией позволил выявить в горизонтальной и вертикальной проекциях зоны сниженной скорости, в которых ожидается формирование снежных отложений.

Также для рассматриваемой конструкции снегозащитного сооружения проведены опытно-экспериментальные работы по оценке снегозадерживающей способности. На опытно-экспериментальном участке принята следующая конструкция снегозащиты: второй ряд защитных ограждений в соответствии с ГОСТ Р 59401 и СТО Автодор 2.27 с установленными сетками на полимерной основе просветностью 50 % на высоту 3,0 м. Сетка на полимерной основе установлена на защитное ограждение на высоту не менее 0,3 м от поверхности земли. Расстояние от бровки земляного полотна до защитных ограждений 60,0–92,0 м.

Вид метелевых отложений снега у снегозащиты приведен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Опытно-экспериментальный участок в конце зимнего периода

Снегомерная съемка и визуальный осмотр показали, что установленная снегозащита эффективна при защите опытно-экспериментального участка от снега во время метелей. Несмотря на большие объемы снегоприноса в районе расположения опытно-экспериментального участка в результате мониторинга снегоотложений получены материалы, подтверждающие эффективную работу защитных сооружений по задержанию метелевого снега.

На конец зимнего периода снегозащитные сооружения находятся в исправном состоянии и эффективно выполняют свою функцию по задержанию переносимого ветром снега. Основная масса снега накапливается за снегозащитными устройствами в виде снежных валов и перед ними, не достигая проезжей части дороги. Фактический объем снежных отложений на момент обследования составил 50–60 % от расчетной снегозадерживающей способности сооружений, что свидетельствует о наличии запаса их работы даже при дальнейшем развитии метелевой деятельности.

Следовательно, снегозащитные сооружения с применением полимерных сеток могут использоваться для защиты дорог от метелевого снега, но необходимо провести дальнейшие исследования для разработки рекомендаций по их проектированию.

Список литературы

1 **Васильев, А. П.** Анализ современного зарубежного опыта зимнего содержания дорог и разработка предложений по его использованию в условиях России / А. П. Васильев, В. В. Ушаков. – М. : Информавтодор, 2003. – 60 с.

2 Моделирование работы однопанельных и двухпанельных снегозадерживающих заборов во время метелей / О. В. Гладышева, Н. Ю. Алимова, Е. А. Бончева, Е. В. Миронова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2025. – Т. 27, № 6. – С. 242–256.

3 Моделирование процесса отложения снега на автомагистралях в программе FlowVision / Т. В. Самодурова, О. В. Гладышева, Н. Ю. Алимова, Е. А. Бончева // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2020. – № 2 (58). – 12 с.

4 FlowVision. Руководство пользователя. – М. : ООО Тесис, 2012. – 326 с.

УДК 624.042:624.072.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ БАЛКИ, ЛЕЖАЩЕЙ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ, ПРИ ВНЕЗАПНОМ ИЗМЕНЕНИИ ИЗГИБНОЙ ЖЁСТКОСТИ

В. А. ГОРДОН

Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, Российская Федерация

В рамках обеспечения безопасности движения поездов и охраны труда при производстве путевых работ рассматривается задача исследования напряженно-деформированного состояния балки в момент изгибного состояния жесткости. Под изгибной жёсткостью здесь понимают способность балки сопротивляться изгибу – она зависит от модуля упругости материала и от момента инерции поперечного сечения. Если один из этих параметров внезапно изменяется, система «балка – основание» вынуждена перестраиваться. Статический прогиб, который был до этого, уже не соответствует новому состоянию жёсткости, и в конструкции возникают инерционные силы. Они и запускают колебания. В результате в балке появляются дополнительные динамические составляющие прогибов и внутренних усилий – в первую очередь изгибающих моментов и напряжений.

С инженерной точки зрения самое неприятное в таком сценарии – то, что динамические напряжения могут существенно превышать те, которые были в статике. Причём именно в тех сечениях, где они и так были максимальными, например у жёстких заделок. Это означает, что даже если конструкция была спроектирована с достаточным запасом прочности по статическим нагрузкам, внезапное изменение жёсткости способно привести к локальному перенапряжению, развитию трещин и, в худшем случае, к потере несущей способности. Особенно опасны такие эффекты при относительно слабом основании: чем меньше его жёсткость, тем сильнее проявляются динамические догружения.

Основная идея решения такой задачи состоит в том, чтобы рассматривать процесс как вынужденные колебания, вызванные «несоответствием» старого статического прогиба новой жёсткости балки. Для этого сначала рассчитывают статическое состояние балки до изменения жёсткости. Затем определяют собственные частоты и формы колебаний той же балки, но уже с новыми параметрами. После этого динамический отклик системы описывают как сумму колебаний по этим формам, а коэффициенты разложения находят из начальных условий: в момент изменения жёсткости прогиб равен старому статическому, а скорость всех точек балки равна нулю. Такой подход позволяет получить картину того, как будут меняться прогибы и изгибающие моменты во времени, и оценить максимальные значения динамических усилий.

Поскольку основание упругое, оно тоже участвует в динамике. Его реакция зависит от прогиба, и это влияет на частоты и формы собственных колебаний. Поэтому нельзя просто взять формулы для свободной балки – нужно учитывать совместную работу балки и основания. Для этого используется метод начальных параметров в матричной форме: состояние любого сечения балки описывается набором четырёх величин – прогиба, угла поворота, изгибающего момента и поперечной силы. Переход от одного сечения к другому осуществляется с помощью матриц влияния, построенных на специальных функциях (в литературе их часто называют функциями Крылова). Такой способ удобен тем, что позволяет единообразно учитывать разные граничные условия и разные типы нагрузок.

Практическая ценность подхода заключается в возможности заранее оценить риски, связанные с внезапным изменением свойств материалов или геометрии. Например, для железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивной среде, можно смоделировать, насколько возрастут изгибающие моменты при снижении модуля упругости бетона. Или оценить последствия поворота сечения, если такой поворот возможен по условиям монтажа или из-за подвижки опор. Результаты расчётов показывают, что в отдельных случаях максимальные моменты могут возрастать в несколько раз по сравнению со статическими значениями. Особенно сильно это проявляется при слабых основаниях: там динамические догружения оказываются наиболее заметными. При более жёстком основании эффект слабее, но всё равно может быть существенным.

Если конструкция потенциально подвержена воздействию факторов, способных резко изменить её жёсткость (например, коррозия, замораживание-оттаивание, радиация), то простого статического расчёта недостаточно. Нужно дополнительно оценивать возможные динамические последствия и предусматривать соответствующие запасы прочности либо конструктивные меры, снижающие риск. Это может быть, например, усиление критических сечений, применение более стойких материалов или устройство дополнительных связей, ограничивающих амплитуды колебаний.

Рассмотрена железобетонная балка, опирающаяся на грунтовое основание. Она рассчитана на определённую нагрузку, и в статике всё в порядке: напряжения не превышают допустимых значений, прогибы укладываются в нормы. Но со временем из-за воздействия хлоридов или сульфатов бетон начинает терять жёсткость – модуль упругости снижается. Это происходит не постепенно, а как бы «скачком»: в какой-то момент структура материала меняется, и жёсткость падает сразу на значительную величину. В этот момент статическое равновесие нарушается: балка «проседает» сильнее, и в ней возникают колебания. Изгибающие моменты в заделке резко возрастают, и именно там, где они и так были максимальными. Если запас прочности был невелик, в этом сечении могут появиться трещины, а при сильном снижении жёсткости – даже произойти разрушение.

При смещении основания балка может повернуться вокруг продольной оси. Если сечение несимметричное (например, прямоугольное), то при повороте его момент инерции относительно горизонтальной оси меняется, а значит, меняется и изгибная жёсткость. Даже если основание и нагрузка остаются прежними, такое изменение способно запустить колебания и вызвать рост внутренних усилий. Причём опасность здесь не только в абсолютном значении моментов, но и в их знакопеременности: в ходе колебаний напряжения могут менять знак, что особенно опасно для материалов, плохо работающих на растяжение (например, бетона без арматуры).

Для инженера такие сценарии важны по нескольким причинам. Во-первых, они показывают, что конструкция может оказаться в опасном состоянии даже без увеличения внешней нагрузки – достаточно внезапного изменения собственных параметров. Во-вторых, динамические эффекты часто не очевидны: интуитивно кажется, что если нагрузка не растёт, то и опасности нет. На деле же внутренние усилия могут существенно возрасти за счёт инерции и перераспределения деформаций. В-третьих, эти эффекты зависят от совместной работы балки и основания, а значит, их нельзя оценить простыми приближёнными методами – нужен корректный учёт граничных условий и свойств основания.

Для обеспечения безопасности движения поездов предлагается методика, которая позволяет количественно оценить, насколько вырастут изгибающие моменты и напряжения при внезапном изменении жёсткости, и как это зависит от параметров основания и геометрии сечения. Результаты численных расчётов наглядно демонстрируют, что при слабом основании динамические догружения могут быть очень значительными. Это значит, что для конструкций, опирающихся на податливые грунты или на упругие подкладки, риск особенно высок, и его нужно учитывать при проектировании и эксплуатации.

На практике такой анализ можно использовать по-разному. Например, при обследовании существующих конструкций, где есть признаки деградации материала, можно оценить, насколько опасными могут быть дальнейшие изменения жёсткости. Или при проектировании новых объектов – закладывать дополнительные запасы прочности в критических сечениях либо выбирать материалы и конструктивные решения, снижающие чувствительность к внезапным изменениям свойств. Кроме того, подобные расчёты полезны для обоснования мер мониторинга: если конструкция подвержена факторам, способным резко изменить её жёсткость, имеет смысл контролировать её состояние и вовремя выявлять опасные изменения.

Таким образом, исследование реакции системы «балка – основание» на внезапное изменение изгибной жёсткости – это не просто теоретическая задача, а важный инструмент для повышения надёжности и долговечности конструкций. Он помогает лучше понимать, как ведут себя несущие элементы в нештатных ситуациях, и заранее предусматривать меры, которые позволят избежать аварийных состояний. В условиях, когда конструкции всё чаще эксплуатируются в агрессивных средах и при сложных нагрузках, такие методы становятся особенно востребованными и позволяют принимать более обоснованные проектные и эксплуатационные решения.

Список литературы

1 **Гордон, В. А.** Реакция системы «балка-упругое основание» на внезапное изменение граничных условий / В. А. Гордон, В. И. Колчунов, В. А. Трифонов // Строительство и реконструкция. – 2018. – № 1 (75). – С. 8–21.

2 **Гордон, В. А.** Динамическое догружение балки при внезапном повреждении упругого основания / В. А. Гордон, О. В. Пилипенко // Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела : Междунар. науч. симпозиум, посвящ. 85-летию В. Г. Зубчанинова. – Тверь, 2015. – С. 127–132.

УДК 624.04:624.072.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БАЛКИ, ЧАСТИЧНО ОПЕРТОЙ НА УПРУГОЕ ОСНОВАНИЕ

В. А. ГОРДОН, Г. А. СЕМЁНОВА
Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, Российская Федерация

В строительстве нередко встречаются конструкции, которые опираются не на жёсткие опоры, а на податливое основание – грунт, щебёночную подушку, балласт. Классический пример – ленточный фундамент, который лежит на грунте и под нагрузкой немного «проседает». Чтобы правильно спроектировать такую конструкцию, инженерам нужно понимать, как балка будет прогибаться, где возникнут самые большие напряжения и как изменится картина, если основание в какой-то зоне ослабнет или вовсе исчезнет.

Для этих целей используют модель балки на упругом основании. Самая простая и при этом достаточно надёжная идея – представить основание как набор независимых пружин: в каждой точке реакция основания пропорциональна прогибу балки. Такой подход называют моделью Винклера. Смысл простой: чем сильнее балка прогнулась в конкретной точке, тем сильнее основание «отталкивается» вверх. Это не идеальная модель реального грунта, но она даёт хорошую первую оценку и позволяет быстро просчитать разные сценарии [1].

Главная сложность возникает, когда основание перестаёт быть однородным. Например, из-за вымывания грунта или просадки часть основания теряет несущую способность. В таком случае балка оказывается частично опертой: на одном участке она по-прежнему лежит на упругом основании, а на другом становится консолью – висит в воздухе без поддержки. Такая ситуация резко меняет распределение усилий: прогибы растут, изгибающие моменты перераспределяются, зона максимальных напряжений смещается. Именно поэтому важно иметь методику, которая позволяет быстро и надёжно оценить последствия таких локальных повреждений [2].

На практике для таких задач применяют метод начальных параметров. Его суть в том, что состояние балки в любой точке можно выразить через её состояние в начале участка – через начальные параметры. К ним относят прогиб, угол поворота, изгибающий момент и поперечную силу в начале сегмента. Дальше, зная нагрузку и свойства балки и основания, можно шаг за шагом «пройти» вдоль балки и вычислить, что происходит в каждом сечении. Такой подход особенно удобен, когда балка состоит из нескольких участков с разными условиями опирания: один участок на основании, другой – консоль, третий – снова на основании [3].

Чтобы сделать расчёты удобными и универсальными, используют матричную запись. Состояние балки в любом сечении представляют как вектор, в котором собраны прогиб, угол, момент и сила. Этот вектор выражают через начальные параметры с помощью матрицы влияния. Матрица учитывает свойства балки (жёсткость на изгиб) и основания (коэффициент постели), а также длину участка. Такой матричный подход позволяет легко «склеивать» соседние участки: состояние конца

предыдущего участка становится начальным для следующего. При этом не нужно заводить огромное количество неизвестных – достаточно определить лишь несколько начальных параметров из условий закрепления на краях балки [4].

Расчёт балки с дефектом основания. Рассмотрим типичный случай: железобетонная балка лежит на основании, но часть основания разрушилась. Расчётную схему разбивают на отдельные участки – сегменты. На каждом сегменте условия опирания свои: где-то балка опирается на упругое основание, где-то висит как консоль. Для каждого сегмента записывают своё описание поведения, а затем «сшивают» их на стыках.

Первый шаг – выбрать расчётную схему и разбить балку на сегменты. Например, если дефект находится у края, получится два сегмента: опертый участок и консольный. Если дефект в середине, сегментов будет три: левый опертый, средний консольный и правый опертый. Важно чётко определить границы сегментов и ввести для каждого свою локальную систему координат – это сильно упрощает дальнейшие выкладки.

Второй шаг – определить ключевые характеристики, которые влияют на поведение балки. К ним относятся длина балки, размеры и форма её поперечного сечения, модуль упругости материала, а также жёсткость основания. Жёсткость основания обычно выражают через коэффициент постели: он показывает, какое усилие нужно приложить, чтобы основание просело на единицу длины. Эти параметры позволяют оценить, насколько сильно основание будет сопротивляться прогибу балки и как изменится её поведение при локальном повреждении.

Третий шаг – записать описание поведения для каждого сегмента. На участке, где балка опирается на основание, её прогибы и усилия зависят и от собственной жёсткости, и от жёсткости основания. На консольном участке основание отсутствует, и балка изгибается только под действием нагрузки и граничных условий. Для каждого сегмента можно выразить прогибы, углы, моменты и силы через начальные параметры этого сегмента.

Четвёртый шаг – учесть условия стыковки сегментов. На границе между сегментами прогиб и угол поворота должны быть непрерывными: балка не может «сломаться» или «разойтись» на стыке. Точно так же должны быть согласованы изгибающий момент и поперечная сила: они не могут резко измениться без внешней сосредоточенной нагрузки или момента. Эти условия позволяют связать начальные параметры соседних сегментов и выразить всё через небольшое число неизвестных.

Пятый шаг – использовать граничные условия на концах балки. Например, если балка закреплена как консоль, на одном конце прогиб и угол равны нулю. На свободном конце изгибающий момент и поперечная сила равны нулю, если там нет дополнительных нагрузок. Подставляя эти условия, получают систему уравнений, из которой находят недостающие начальные параметры. После этого можно вычислить прогибы и усилия в любом сечении балки.

Шестой шаг – построить эпюры и проанализировать результаты. Эпюры прогибов и изгибающих моментов наглядно показывают, где возникают наибольшие деформации и напряжения. По ним видно, как меняется картина при разной длине дефекта и разной жёсткости основания. Это помогает понять, насколько конструкция чувствительна к локальным повреждениям и где нужно усилить армирование или предусмотреть дополнительные меры защиты.

Седьмой шаг – проанализировать чувствительность модели. Полезно просчитать несколько сценариев: разная длина утраченного участка основания, разные нагрузки, разные свойства грунта. Такой анализ показывает, какие параметры сильнее всего влияют на поведение конструкции и где риски наиболее высоки. Например, может оказаться, что даже небольшой дефект у края приводит к резкому росту изгибающего момента в зоне перехода от опертого участка к консоли.

Выводы. Результаты такого расчёта дают не просто цифры прогибов и моментов, а понимание того, как конструкция реагирует на локальные повреждения. Из этого следуют важные практические выводы.

Во-первых, прогибы заметно растут при увеличении длины дефекта. Чем больше участок, где основание отсутствует, тем сильнее балка прогибается под нагрузкой. Это важно для эксплуатационной пригодности: большие прогибы могут привести к трещинам, нарушению примыканий, повреждению отделки и даже к потере несущей способности. Поэтому даже если конструкция формально остаётся прочной, чрезмерные прогибы могут сделать её непригодной для эксплуатации.

Во-вторых, изгибающие моменты существенно перераспределяются. Наибольший момент часто возникает не в середине пролёта, а вблизи границы между опертым и неопертым участками. При росте дефекта эта зона смещается, и максимальные напряжения оказываются ближе к краю

опертой части. Это нужно учитывать при армировании: основную арматуру ставят там, где ожидаются наибольшие моменты, и положение этой зоны может меняться при повреждении основания.

В-третьих, конструкция становится чувствительнее к жёсткости основания. Если основание жёсткое, балка меньше прогибается, но при этом локальное повреждение вызывает более резкие изменения в распределении усилий. В таких случаях даже небольшой дефект может привести к значительному росту моментов и потребовать усиления. Если основание мягкое, прогибы больше, но перераспределение усилий происходит более плавно, и конструкция лучше «гасит» локальные проблемы.

Список литературы

1 **Гордон, В. А.** Реакция системы «балка – упругое основание» на внезапные изменения граничных условий / В. А. Гордон, В. И. Колчунов, В. А. Трифонов // Строительство и реконструкци. – 2018. – № 1. – С. 8–21.

2 **Gordon, V.** Vibration of loaded beam initiated by fully or partially destruction of the elastic foundation / V. Gordon, O. Pilipenko // Proceedings of the 22 Intern. Congress on sound and vibration. – Florence, 2015.

3 **Gordon, V. A**. Transient dynamic process in a structurally nonlinear system «beam-elastic foundation» / V. A. Gordon, O. V. Pilipenko, V. A. Trifonov // Proceedings of 6-th European Conference on Computational Mechanics (ECCM6). – Glasgow, 2018.

4 **Толоконников, Л. А.** Механика деформируемого твердого тела : учеб. пособие / Л. А. Толоконников. – М. : Высш. шк., 1979. – 580 с.

УДК 625.76.08

ПРОЦЕССЫ ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИТЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

И. М. ДАВЫДЧИК, А. А. БОНДАРЕНКО
Дорожно-эксплуатационное управление № 45 – филиал РУП «Гомельавтодор»,
г. Хойники, Республика Беларусь

Обеспечение качества транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог, соответствующего требованиям нормативных документов, является одной из приоритетных задач дорожного хозяйства Республики Беларусь. Выбор эффективных технологий текущего ремонта, обеспечивающих долговечность покрытий и сокращение сроков ограничения движения транспорта, является актуальной экономической задачей. Одним из перспективных направлений в данной области является применение литых асфальтобетонных смесей для устройства защитных слоев дорожных покрытий и реабилитации асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог общего пользования, улиц и дорог городов, поселков и сельских населенных пунктов, а также мостовых сооружений. Ежегодно в республике фиксируются значительные объемы ямочности, колейности и трещин, возникающих вследствие воздействия транспортных нагрузок и климатических факторов, что требует оперативного вмешательства дорожных служб с использованием материалов, обеспечивающих высокую скорость восстановления покрытия [1].

Литые асфальтобетонные смеси представляют собой смеси с повышенным содержанием асфальтовяжущего вещества и минерального порошка, которые в горячем состоянии обладают вязкотекучей консистенцией, не требующей уплотнения. Согласно ТКП 059.1-2023, особенностью технологии является способность смеси заполнять любые неровности ремонтируемой поверхности под действием собственного веса, образуя монолитный слой без применения катков [1]. В состав литых смесей, как правило, входят вязкие дорожные битумы (возможно модифицирование полимерами), минеральный порошок с высокой удельной поверхностью, песок и щебень мелких фракций. Повышенное содержание битума (до 9–11 % по массе) и асфальтовяжущего обеспечивает смеси высокую удобоукладываемость и способность к самоуплотнению, однако требует строгого соблюдения температурных режимов приготовления и транспортировки во избежание старения вяжущего и расслоения смеси [2].

Подбор гранулометрического состава минеральной части должен точно соответствовать требованиям нормативных документов: избыток крупного заполнителя снижает подвижность, а его недостаток приводит к излишней текучести и уменьшению сдвигоустойчивости покрытия. При проектировании состава отслеживается соотношение песчаной и порошкообразной фракций, обеспечивающее

оптимальную вязкость при рабочих температурах. Это свойство делает возможным проведение текущего ремонта в стесненных городских условиях, на мостовых сооружениях, в зонах трамвайных путей и в местах, где работа тяжелой уплотняющей техники затруднена или невозможна.

Процесс производства работ с применением литых асфальтобетонных смесей технологически имеет свои особенности. Транспортировка материала целесообразна в специализированных термосах-миксерах, оснащенных системами подогрева и перемешивания для предотвращения расслаивания смеси и поддержания требуемой температуры в пределах 200–220 °С. В отличие от горячих асфальтобетонных смесей, требующих уплотнения, применение литого асфальтобетона позволяет исключить укатку из технологического процесса и, как следствие, не требует использования катков. Белорусские ученые отмечают это в качестве преимущества: достаточно равномерного распределения смеси вручную или средствами малой механизации, после чего происходит процесс самоуплотнения и остывания [2]. Технологическая последовательность включает подготовку ремонтируемой карты (очистку, обеспыливание, при необходимости фрезерование кромок), подгрунтовку основания битумной эмульсией, укладку литой смеси и последующую обработку поверхности черным щебнем для создания шероховатости. Это позволяет существенно сократить время закрытия полосы движения на ремонт, что повышает эффективность их использования для магистральных улиц городов. Для зоны жилой застройки отсутствие работы уплотняющей техники способствует снижению уровня шума и вибрационного воздействия на окружающую застройку [3].

Физико-механические свойства литых смесей обеспечивают высокую устойчивость к воздействию воды и агрессивных противогололедных реагентов, благодаря нулевой остаточной пористости. Исследования, проведенные в БелдорНИИ, показывают, что водонасыщение литого асфальтобетона, как правило, не превышает 1 % по объему, что гарантирует высокие показатели морозостойкости и долговечности отремонтированных участков в условиях знакопеременных температур, характерных для климата Республики Беларусь [3]. При этом монолитность слоя исключает проникновение воды к нижележащим слоям дорожной одежды, предотвращая развитие процессов выкрашивания и разрушения основания. В свою очередь повышенное содержание битума требует втапливания (втирания) черного щебня или песка в поверхность свежеуложенного слоя для придания покрытию необходимой шероховатости и обеспечения коэффициента сцепления, соответствующего нормативным требованиям СТБ 1291 [4]. Поэтому технологический процесс включает операции по распределению и втапливанию черного щебня фракции 5–10 мм сразу после укладки смеси, пока она находится в пластичном состоянии.

Как было отмечено ранее, экономическая эффективность применения литых асфальтобетонных смесей в процессах текущего ремонта обусловлена снижением в составе сметной стоимости затрат на эксплуатацию машин и механизмов (исключение катков) и ускорением темпов работ. Несмотря на более высокую первоначальную стоимость материала по сравнению с традиционными горячими смесями, сокращение вышеназванных затрат в совокупности с эффектом от уменьшения простоев транзитного транспорта делает данную технологию целесообразной в конкретных производственных условиях. Анализ стоимости жизненного цикла показал, что суммарные дисконтированные затраты на содержание участков, отремонтированных литыми смесями, в условиях интенсивного городского движения на 15–20 % ниже за счет увеличения межремонтных сроков [5]. Кроме того, возможность повторного использования старого асфальтобетона при приготовлении литых смесей (до 20 % от массы) дополнительно снижает стоимость материала и уменьшает потребность в новых минеральных ресурсах, что соответствует принципам устойчивого развития. Дополнительным преимуществом является возможность укладки литых смесей в неблагоприятных погодных условиях (при отрицательных температурах до –10 °С), что позволяет продлить строительный сезон и проводить аварийный ремонт в зимний период, когда применение традиционных технологий ограничено. Практика показывает, что выполнение ямочного ремонта литыми смесями зимой на улицах Минска и областных центров позволяет быстро ликвидировать аварийные дефекты и обеспечить безопасность движения до наступления благоприятного строительного сезона [4].

Таким образом, процессы текущего ремонта с применением литых асфальтобетонных смесей представляют собой высокотехнологичное решение, отвечающее современным требованиям дорожного хозяйства Республики Беларусь. Технология обеспечивает высокую адгезию к старому покрытию, водонепроницаемость и скорость ввода объекта в эксплуатацию. Снижение объемов использования тяжелой уплотняющей техники уменьшает выбросы отработавших газов и потребле-

ние топлива на объекте ремонта, а длительный срок службы отремонтированных участков сокращает потребность в повторных ремонтах и расходовании невозобновляемых природных ресурсов [2].

Чтобы продлить межремонтный срок покрытий, устроенных с применением литых асфальтобетонных смесей, целесообразно дополнительно выполнить поверхностную обработку защитными слоями. Как правило, она проводится через несколько лет после капитального ремонта объектов. Нормативные документы регламентируют межремонтный интервал от 6 до 8 лет. При этом защитная обработка позволяет продлить этот ресурс вдвое.

Список литературы

1 ТКП 059.1-2023 (33200). Автомобильные дороги. Правила устройства. – Введ. 01.01.2024. – Минск : БелдорНИИ, 2023. – 156 с.

2 **Ковалев, Я. Н.** Технология дорожного строительства : учеб. пособие / Я. Н. Ковалев, С. Е. Кравченко. – Минск : Новое знание, 2022. – 384 с.

3 Анализ работы покрытий из литых асфальтобетонных смесей на объектах улично-дорожной сети г. Минска / А. В. Бусел [и др.] // Автомобильные дороги и мосты. – 2024. – № 1. – С. 34–39.

4 СТБ 1291-2026. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию. – Введ. 01.07.2023. – Минск : Госстандарт, 2023. – 28 с.

5 **Подшивалов, В. П.** Перспективы применения литых асфальтобетонных смесей при ремонте городских улиц / В. П. Подшивалов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2024. – № 2. – С. 41–46.

УДК 625.1

ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ТРАССЫ, ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ И ПЛАНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЛИНИИ

Н. В. ДОВГЕЛЮК, Е. М. МАСЛОВСКАЯ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

П. Н. БАРАБОЛКИН
Белорусская железная дорога, г. Молодечно

Социально-экономическое развитие, переустройство, модернизация и реконструкция железнодорожного транспорта указывают на дальнейшую перспективу роста пропускной и провозной способности железных дорог, скоростей движения поездов, нового железнодорожного строительства [1].

Реконструктивные мероприятия, требующие капитальных вложений, представляют собой следующие работы: спрямление трассы, уположение или уменьшение расчетного подъема, улучшение плана линии и другие мероприятия. Например, по трассе – уменьшение коэффициента развития линии, удлинение трассы, увеличение напряженных ходов; по продольному профилю – уменьшение суммы преодолеваемых высот и протяженности тормозных спусков; по плану линии – уменьшение протяженности криволинейных участков пути, углов поворота, дополнительного сопротивления от кривых, увеличение радиусов кривых, длин прях вставок между смежными кривыми.

Уположение расчетного подъема с целью увеличения скорости и массы состава грузового поезда определяется по формуле (1) и производится в период выполнения капитального ремонта железнодорожного пути. Весу грузового поезда соответствует расчетный или эквивалентный по массе подъем, величина которого определяется из выражения

$$i_{\text{р}} = i_{\text{экв}} \frac{F_{\text{к}} - (Pgw_{\text{о}}^{'} + Q_{\text{сущ}} g w_{\text{о}}^{''})}{Pg + Q_{\text{сущ}} g}, \quad (1)$$

где P – вес локомотива, Н; $Q_{\text{сущ}}$ – существующая на дороге весовая норма состава, т.

На железнодорожном пути встречаются незатяжные подъемы круче расчетного, которые поезд проходит за счет накопленной энергии на спусках. Если на дороге начинают обращаться тяжеловесные длинносоставные поезда с повышенной весовой нормой $Q_{\text{пов}}$, то некоторые из них становятся ограничивающими провозную способность подъемами. Чтобы не допустить снижение

скорости ниже расчетной, часть таких подъемов смягчается. Величина уклона после смягчения определяется по формуле

$$i_{\text{экв}} = \frac{F_{\text{к}} - (Pgw_{\text{о}}' + Q_{\text{пов}}gw_{\text{о}}'')}{Pg + Q_{\text{пов}}g}. \qquad (2)$$

Кроме основного показателя продольного профиля – руководящего уклона, не менее важными являются такие показатели как длина вредных спусков и сумма преодолеваемых высот. Спуск считается вредным после начала торможения на нем поезда. Спуск вредный, так как при торможении изнашиваются бандажи колес и рельсы, а также безвозвратно гасится накопленная кинетическая энергия поезда. При реконструкции продольного профиля следует уменьшать длину тормозных спусков, если возможно, спрямляя трассу.

Если требуется определить длину вредного спуска, не строя кривую скорости, то можно это сделать по продольному профилю – спуск называется «вредным», если уклон круче 4 ‰ и теряемая высота более 10 м. Примеры приведены на рисунке 1. Наиболее точно данный спуск может быть отнесен к числу вредных либо безвредных путем построения кривой скорости $v = f(s)$. От показателя сумма преодолеваемых высот зависит расход топлива или электроэнергии.

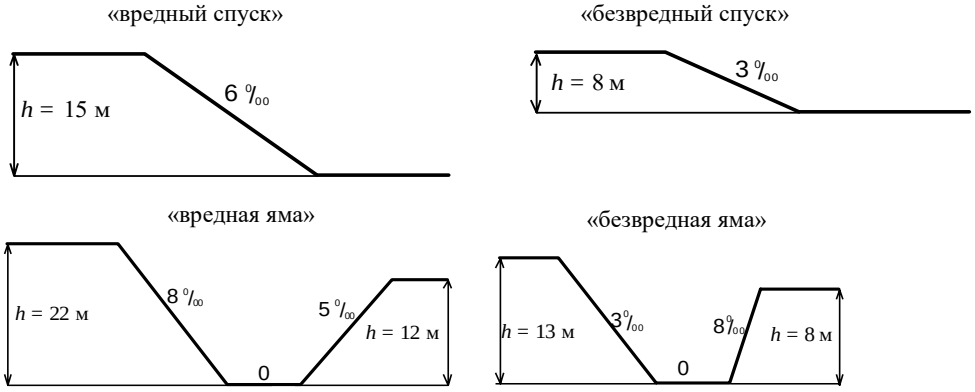


Рисунок 1 – Схемы участков с вредными и безвредными спусками

На железных дорогах, построенных еще в XIX веке, допускалось избыточное развитие трассы с целью обхода и пересечения препятствий. В настоящее время при наличии современной техники появилась возможность спрямления участков с избыточным развитием линии. Спрямление целесообразно на дорогах, имеющих большие размеры перевозок, подлежащих электрификации, где предусматривается строительство второго главного пути. С экономической точки зрения спрямление целесообразно, если срок окупаемости инвестиций оправдается экономией в эксплуатационных расходах. К показателям трассы относятся удлинение и коэффициент развития линии. Чем меньше коэффициент развития линии, тем трасса короче и тем меньшие инвестиции потребуются на ее строительство.

На существующих железных дорогах с целью уменьшения объема земляных работ использовались кривые малых радиусов, которые в настоящие время сдерживают скорости движения поездов. Величину радиуса кривой R при известной скорости движения поезда по кривой v можно предварительно вычислить из выражения $R = 0{,}047\ v^2$. При увеличении радиуса кривой снимается ограничение скорости. Такое мероприятие рекомендуется осуществлять в первую очередь на перегонах, лимитирующих пропускную способность. Дальнейшее улучшение плана линии следует производить поэтапно, повышая скорость движения поездов. Улучшение плана линии возможно за счет реконструкции прямых вставок между смежными кривыми, направленными в одну и в разные стороны. Возможно увеличение прямых вставок, замена двух кривых третьей большего радиуса и решение других задач по улучшению плана железной дороги.

Остро стоит проблема нормирования соотношения скоростей движения пассажирских и грузовых поездов. Повышение скоростей движения пассажирских поездов с жестко нормированным временем хода требует увеличения скоростей движения по всем перегонам и соответствующего

переустройства кривых с увеличением возвышения наружного рельса. Ввод на этом этапе в обращение тяжеловесных поездов, имеющих в своем составе вагоны с осевой нагрузкой до 26 т, приводит к ограничению скоростей движения грузовых поездов и требует уменьшения возвышения наружного рельса в кривых. В результате таких действий происходит нарушение равновесия в системе «путь – подвижной состав» и повышение износа как верхнего строения пути, так и подвижного состава.

Список литературы

1 Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года : одобр. на заседании Президиума Совета Министров Респ. Беларусь (протокол от 2 мая 2017 г., № 10). – Минск, 2017. – 148 с.

УДК 625.1

ВЛИЯНИЕ ПРОВОЗНОЙ СПОСОБНОСТИ НА ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Н. В. ДОВГЕЛЮК, Е. М. МАСЛОВСКАЯ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

И. С. ТРУШКО
Белорусская железная дорога, г. Витебск

Рост значимости железных дорог в экономическом развитии страны определяется их ролью в качестве стратегического ресурса национальной транспортной системы и конкурентоспособности транспортного комплекса, обеспечения экономической безопасности и обороноспособности, реализации социальной политики государства и дальнейшего повышения деловой активности населения, повышения безопасности дорожного движения, позволяющего удовлетворить международные, общегосударственные и региональные нужды в перевозках грузов и пассажиров.

14 марта 2025 года в Москве под председательством российской стороны состоялось первое Совещание руководителей железных дорог государств – членов Евразийского экономического союза. В нем приняли участие главы магистралей Беларуси, России, Казахстана, Кыргызстана и Армении. Стороны подвели итоги работы в 2024 году, определили перспективы дальнейшего взаимодействия железных дорог государств – членов ЕАЭС, обсудили совместные логистические проекты, в том числе развитие перевозок по международным транспортным коридорам и применение цифровых технологий, а также подписали ряд документов, которые регламентируют проведение подобных встреч в новом формате, а также план работы на 2025–2026 годы.

Начальник государственного объединения «Белорусская железная дорога» Валерий Веренич в своем выступлении отметил, что заметен потенциал роста объемов перевозок грузов с каждой железной дорогой государств – членов ЕАЭС, а также по международным коридорам Север – Юг, Восток – Запад и в рамках инициативы «Один пояс, один путь».

Обеспечена положительная динамика экспорта с Казахстаном, Азербайджаном, Кыргызстаном, Таджикистаном, Туркменистаном. Увеличился вывоз белорусских грузов в направлении Ирана. Созданы условия для доставки продукции с задействованием портов северо-западного региона России, российских портов Черного и Азовского морей, по сухопутным маршрутам в направлении Китая, стран Азии, а также с использованием международного коридора «Север – Юг» в направлении Ирана и Индии, портов Каспийского моря. Реализуются проекты мультимодальных перевозок с поставкой белорусских товаров в страны Африки, Латинской Америки.

Основными трендами в логистике становятся глобальные изменения цепочек поставок, диверсификация маршрутов, запуск новых контейнерных сервисов и усиление контейнеризации грузопотоков, внедрение цифровых «зеленых» технологий.

С учетом этого для успешного развития международного интермодального бизнеса необходимо выполнение ряда условий, в том числе создание финансовой инфраструктуры, единого прозрачного тарифа и единой нитки графика, сети локальных распределительных центров, а также расширение горизонтов планирования.

В ходе работы по цифровизации грузовых международных перевозок и перевода перевозочных и товарораспределительных документов в цифровой формат БЖД совместно с ОАО «РЖД» и другими участниками интермодальной перевозки обеспечено распространение технологии ИНТЕРТРАН на новый маршрут.

Участок железной дороги Витебск – Езерище, входящий в IX международный транспортный коридор, имеет большой транспортный потенциал. Вагонопоток через ст. Езерище направляется в порты Мурманска, Псков, Санкт-Петербург. Нефтепродукты из Полоцка едут в РФ, Китай, туда же отгружаются и наши калийные удобрения. В августе из Беларуси в Узбекистан через Россию отправился длинносоставный поезд «Славянский караван».

Основные инфраструктурные ограничения скорости движения поездов: на кривых участках пути малых радиусов 550–700 метров; на стрелочных переводах по общему состоянию пути; на переездах [1, 2].

Средняя протяженность кривых участков по Белорусской железной дороге составляет около 25 %, в том числе протяженность существующих кривых на участке Витебск – Езерище составляет в среднем 45% от общей длины участка, что указывает на сложность участка и требует реконструкции и модернизации.

Реконструкция участка железной дороги Витебск – Езерище включает: увеличение радиусов кривых; замену составных кривых на однорадиусные; удлинение переходных кривых и прямых вставок; вынос из кривых стрелочных переводов, расположенных на главных путях; замену на главных путях обычных стрелочных переводов на скоростные; улучшение плана и профиля пути; реконструкцию искусственных сооружений или строительство новых сооружений в связи со сдвижкой пути при переустройстве его плана и другие мероприятия.

Повышению скорости движения поездов, а, следовательно, и пропускной способности участка однопутной железной дороги, будет способствовать строительство двухпутных вставок для обеспечения безостановочного скрещения поездов.

Двухпутные вставки устраиваются с целью организации безостановочного скрещения поездов, что требует вставку значительной длины (больше длины поезда и больше площадки раздельного пункта). Длина двухпутной вставки зависит от длины поезда, длины тормозного пути, скорости движения при скрещении, от времени установки выходного маршрута и открытия сигнала.

Длина вставки будет минимальной, если встречные поезда будут проходить ОБС одновременно. Длина двухпутной вставки определяется расчетом. Если принять время опоздания 2 мин, среднюю скорость движения 50 км/ч, то длина прямой вставки будет около 4 км.

Уположение или уменьшение расчетного подъема производится с целью увеличения скорости или массы состава поезда. Масса состава грузового поезда определяется по известной формуле. Каждой весовой норме на дороге соответствует расчетный или эквивалентный по массе подъем.

На некоторых дорогах имеются подъемы круче расчетного, которые носят, как правило, незатяжной характер, преодолеваются за счет накопленной кинетической энергии поезда. Если на дороге повышается весовая норма поезда $Q_{\text{пов}}$, то некоторые из них становятся ограничивающими. Чтобы не допустить снижение скорости ниже расчетной, часть таких подъемов смягчается. Величина уклона после смягчения определяется по формуле

$$i_{\text{экв}} = \frac{F_{\text{к}} - (Pgw_{\text{о}}^{'} + Q_{\text{пов}} g w_{\text{о}}^{''})}{Pg + Q_{\text{пов}} g}. \qquad (1)$$

Переустройство участка Витебск – Езерище, входящего в IX международный транспортный коридор, свяжет порты Мурманска с Юго-Восточной Азией и Россией через Беларусь, ускорит доставку грузов и пассажиров к месту требования.

Список литературы

1 Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года : одобр. на заседании Президиума Совета Министров Респ. Беларусь (протокол от 2 мая 2017 г., № 10). – Минск, 2017. – 148 с.

2 **Турбин, И. В.** Изыскания и проектирование железных дорог: учеб. для вузов / И. В. Турбин. – М. : Транспорт, 1989. – 479 с.

УДК 625.1:528.4

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ ОТРАСЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ

И. П. ДРАЛОВА, М. Ю. НИКИТЕНКО, Н. С. СЫРОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Программу инженерно-геодезических изысканий отраслевых объектов всегда адаптируют под их уникальные задачи и сложности, как правило выполняют сбор и анализ данных прошлых лет, геодезическую основу (сети), топографическую съемку и мн. др. Рекогносцировочное обследование участка позволяет оценить и выявить особенности работ на местности, а также наметить дальнейший план. Процесс обычно делят на подготовительный, полевой и камеральный, все проводимые мероприятия необходимы для разработки безопасного экономически, экологически и юридически проекта [5].

Здания и сооружения являются частью транспортной инфраструктуры, их реконструкция и модернизация сопряжены с повышенными рисками, поскольку такие объекты насыщены инженерными коммуникациями, а работы часто ведутся в стеснённых условиях действующего предприятия. Повреждение подземных коммуникаций при земляных работах может привести к остановке технологических процессов, аварийным ситуациям и угрозе жизни людей.

Необходимым условием предотвращения таких ситуаций является проведение инженерно-геодезических изысканий для модернизации капитальных строений на территории транспортного предприятия. Рассмотрим здесь технологический комплекс на конкретном участке.

Работы выполнялись в местной системе координат. Высота сечения рельефа составила 0,5 м, масштаб съёмки – 1:500. Съёмочное обоснование создавалось с использованием спутниковых измерений в режиме реального времени (RTK), обеспечивающих получение координат непосредственно в полевых условиях [4]. Точки планово-высотного обоснования закреплялись центрами люков смотровых колодцев, металлическими штырями и закоординированными углами капитальных зданий. Уравнивание результатов выполнялось автоматизированно.

Для съёмки застроенной территории использовали электронный тахеометр Trimble M3 5DR. Полярный способ съемки позволил с высокой точностью определить координаты и высоты объектов. Прибор прошёл метрологическое освидетельствование, что гарантировало единство измерений [2]. Обследование материалов прошлых лет показало, что они не в полной мере соответствуют современным нормативным требованиям [1]. Поэтому на участках, где изменения местности превысили 35 %, была выполнена новая съёмка.

Особое внимание уделялось подземным коммуникациям. Производилось нивелирование колодцев, определялись материал и диаметр вводов, устанавливались связи между колодцами. Глубина заложения прокладок измерялась глубинной рейкой. Для обнаружения безколодезных прокладок использовался трубокабелеискатель DEGICAT 200. Полнота нанесения коммуникаций согласовывалась с эксплуатирующими организациями. Совмещение топографического плана с планом подземных коммуникаций позволило получить полную картину инженерной обстановки [3].

Камеральная обработка выполнялась в программных комплексах ТИМ КРЕДО ТРАНСФОРМ и ТИМ КРЕДО ТОПОГРАФИЯ. Результаты представлены в форматах dxf, dwg. Технический контроль включал визуальный просмотр планов и набор контрольных пикетов. Результаты фиксировались в акте приёмки.

Полученные данные позволили выявить несоответствия между проектной и фактической документацией, что особенно важно при реконструкции. Своевременное обнаружение таких расхождений предотвращает аварии при земляных работах и обеспечивает надёжность энергоснабжения и связи.

При модернизации и эксплуатации зданий и сооружений транспортной инфраструктуры также недостаточно ограничиваться только съёмкой текущего состояния. Конструкции могут претерпевать деформации под воздействием эксплуатационных нагрузок, изменений гидрогеологических условий, вибраций от движения транспорта и других факторов. Своевременное выявление осадок,

кренов (отклонение вертикальной оси или плоскости здания, сооружения или отдельной конструкции от вертикального положения), горизонтальных смещений позволяет предотвратить аварийные ситуации.

Согласно нормативным документам, геодезические методы следует применять для измерения вертикальных и горизонтальных перемещений искусственных сооружений, земной поверхности и грунтового массива [1]. При этом используют нивелиры, теодолиты, тахеометры, сканеры, а также GNSS-приёмники.

Мониторинг может включать измерение следующих параметров:

– вертикальные перемещения (осадки, просадки, подъёмы, прогибы);

– горизонтальные перемещения (сдвиги);

– наклоны (крены и кручение).

По результатам наблюдений определяют участки с наибольшими отклонениями, величины и направления деформационных процессов, а также закономерности, позволяющие прогнозировать их развитие.

Для объектов транспортной инфраструктуры особенно важно, что деформации могут влиять на геометрию путей, контактной сети, устройств сигнализации и связи. Например, осадка фундамента под опорой контактной сети или крен здания поста электрической централизации может привести к нарушению работы систем управления движением. Поэтому геодезический мониторинг является неотъемлемой частью системы обеспечения безопасности перевозочного процесса (таблица 1) [2].

Таблица 1 – **Основные геодезические методы и средства измерений, применяемые при мониторинге зданий и сооружений транспортной инфраструктуры**

Метод	Средства измерений	Определяемые параметры	Область применения
Геометрическое нивелирование	Оптический или цифровой нивелир	Вертикальные перемещения (осадки, подъёмы)	Фундаменты, опоры, пути
Тригонометрическое нивелирование	Теодолит, тахеометр	Вертикальные и горизонтальные перемещения	Здания, мосты, эстакады
Метод створных наблюдений	Теодолит, тахеометр	Горизонтальные сдвиги	Протяжённые сооружения
Спутниковые измерения (GNSS)	GNSS-приёмники (RTK, статика)	Пространственные перемещения	Мосты, тоннели, крупные объекты
Лазерное сканирование	Наземный лазерный сканер	Деформации конструкций, крены	Сложные геометрические объекты

Таким образом, инженерно-геодезические изыскания являются неотъемлемым условием безопасной модернизации зданий и сооружений транспортной инфраструктуры. Комплексный подход, включающий съёмку текущего состояния, обследование коммуникаций и мониторинг деформаций, обеспечивает предотвращение аварий, защиту жизни и здоровья людей, а также бесперебойную работу транспорта.

Список литературы

1 СН 1.02.01-2019. Инженерные изыскания для строительства : утв. постановлением М-ва архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь от 26 дек. 2019 г. № 74 : введ. 21.09.2020. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 180 с.

2 **Атрошко, Е. К.** Прикладная геодезия и современные инженерно-геодезические технологии : учеб.-метод. пособие / Е. К. Атрошко, И. П. Дралова, Н. С. Сырова. – Гомель : БелГУТ, 2023. – 97 с.

3 **Сырова, Н. С.** Геодезические технологии в контексте экологической безопасности / Н. С. Сырова, И. П. Дралова, М. Ю. Никитенко // Проблемы техносферной и экологической безопасности в промышленности, строительстве и городском хозяйстве : материалы III Междунар. науч. конф., Макеевка, 13 февр. 2025 г. – Макеевка : Донбас. нац. акад. стр-ва и архитектуры, 2025. – С. 256–259.

4 Инженерная геодезия и фотограмметрия : учеб.-метод. пособие для вузов / Е. К. Атрошко, И. П. Дралова, Г. М. Куновская, Н. С. Сырова. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 100 с.

5 **Сырова, Н. С.** Геодезические аспекты охраны окружающей среды и заповедного дела / Н. С. Сырова, И. П. Дралова, М. Ю. Никитенко // Журналистика и география : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Воронеж, 2026. – С. 31–33.

УДК 625.7/.8

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Е. М. ЖУКОВСКИЙ, С. Е. КРАВЧЕНКО
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Современные автомобильные дороги работают в условиях пространственной неоднородности транспортных и климатических воздействий. Наиболее интенсивное накопление дефектов наблюдается на внешних полосах движения, примыкающих к обочине. Это подтверждается натурными обследованиями дорожной сети в трёх дорожно-климатических зонах: при фактических коэффициентах распределения нагрузки на внешней полосе 0,457 для четырёхполосной и 0,331 для шестиполосной дороги нормативные значения во многих методиках оказываются заниженными [1]. Детерминированные методы проектирования, основанные на осреднённых коэффициентах, не позволяют в полной мере учесть эту неравномерность и обеспечить заданный уровень надёжности [1, 4].

Вероятностный подход к проектированию дорожных одежд предполагает раздельный учёт транспортной и климатической составляющих накопления повреждений. Для этого предложена сегментация полосы движения на внешний и внутренний участки. Отношение дефектности внешнего и внутреннего сегментов $\Delta = S_{outer}/S_{inner}$ описывается экспоненциальной моделью

$$\Delta = ae^{bT},$$

где T – срок службы. Для трёх климатических зон получены зависимости с коэффициентом детерминации $R^2 > 0{,}96$. Дополнительно введён параметр Y – суммарная ширина гидроизоляции, включающая укреплённые обочины, остановочные полосы и специальные гидроизолирующие слои. Увеличение Y с 0,5 до 2,5 м снижает скорость роста отношения дефектности в 2–3 раза, что подтверждает механизм боковой инфильтрации влаги и необходимости её ограничения [5].

Баланс транспортного и климатического воздействий описывается соотношением

$$G_{clim}/G_{traff} = 0{,}0558T - 0{,}1957 (R^2 = 0{,}614),$$

справедливым для сроков службы 5–20 лет [1]. На начальном этапе эксплуатации (первые 4–5 лет) преобладает транспортная составляющая – 80–90 % дефектов; после 14–15 лет доминируют климатические факторы – 70–80 % дефектов [1]. Это означает, что надёжность дорожной одежды должна оцениваться как функция времени и пространственного положения полосы.

Вероятностная модель совместного воздействия строится на предположении о статистической независимости транспортной нагрузки и климатических процессов:

$$P_{f,total}(T, Y, N) = P_{f,clim}(T,Y) \cdot P_{f,traff}(T,N).$$

На основе этой модели определяется требуемый коэффициент жёсткости K_{req}, обеспечивающий заданную вероятность безотказной работы [1, 4, 6]. Апробация методики при реконструкции дороги в Беларуси показала: при нормативном коэффициенте $K_{norm} = 1{,}06$ расчётный коэффициент составил $K_{req} = 1{,}10$. Это увеличило материалоёмкость конструкции на 17,6 %, но позволило повысить прогнозируемый срок службы с 6 до более чем 9 лет, сократить продолжительность весенних ограничений с 10 до 3 дней и получить положительные экономические показатели: NPV – 235 тыс. руб./км, IRR – 25,3 % [1]. Таким образом, вероятностное проектирование действительно обеспечивает заданную надёжность, однако требует дополнительных первоначальных затрат.

Снизить это удорожание позволяют ресурсосберегающие технологии. Первое направление – производство горячей асфальтобетонной смеси со вспениванием битума непосредственно в смесителе за счёт контролируемого введения влажного песка [2]. Сущность метода: 22 % песчаной фракции вводится влажной (4–7 % влажности) без предварительного нагрева, а остальной сухой заполнитель перегревается до 295 °С. При контакте горячего битума с влажным песком происходит

мгновенное парообразование и вспенивание вяжущего. Оптимальное содержание битума снижается на 10 %. При этом прочность на сжатие при 20 °С возрастает на 7,2 %, при 50 °С – на 6,1 %, водонасыщение снижается на 13,2 %, а сцепление битума с заполнителем после кипячения превышает 90 % [2, 7]. Суммарное энергопотребление уменьшается с 229 до 194 МДж/т [2, 8]. Метод не требует специального вспенивающего оборудования и может быть реализован на существующих асфальтобетонных заводах [2, 9].

Второе направление – устройство основания дорожной одежды из асфальтогранулята с добавлением жидкого нефтяного шлама в количестве 1–6 % от массы асфальтогранулята [3]. Нефтешлам временно размягчает битумные плёнки на поверхности гранул, улучшает уплотняемость и связывание частиц. Лабораторные исследования показали: коэффициент уплотнения возрастает с 1,13 до 1,25, плотность в уплотнённом состоянии – с 2,21 до 2,43 г/см³, прочность на сжатие при 20 °С достигает 2,20 МПа [3]. Одновременно решается экологическая задача утилизации нефтешламов и снижается потребность в первичных минеральных материалах.

Совместное применение вероятностного проектирования и ресурсосберегающих технологий даёт синергетический эффект. Вероятностная методика позволяет дифференцировать требования к жёсткости по ширине проезжей части: на внешних полосах, где транспортно-климатическая нагрузка максимальна, назначается повышенный коэффициент K_{req}, а на внутренних – более экономичная конструкция [1]. Слои, устроенные с использованием ресурсосберегающих технологий – вспененный асфальтобетон и основание из асфальтогранулята с нефтешламом – снижают расход битума, энергозатраты и стоимость материалов [2, 3]. За счёт этого дополнительная стоимость, связанная с повышением надёжности, может быть существенно снижена или полностью компенсирована.

Таким образом, только вероятностные методы позволяют количественно обосновать заданную надёжность дорожной одежды с учётом пространственной неравномерности воздействий. Однако переход к вероятностному проектированию сопровождается ростом материалоёмкости. Применение ресурсосберегающих технологий – вспенивания битума влажным заполнителем и устройства оснований из асфальтогранулята с нефтешламом – нивелирует этот эффект, обеспечивая одновременно надёжность, экономическую эффективность и экологическую безопасность. Дальнейшие исследования должны включать локальную калибровку вероятностных моделей для различных регионов, оценку длительной эксплуатационной надёжности и полный жизненный цикл дорожных одежд [1, 2, 6].

Список литературы

1 **Жуковский, Е. М.** Нежесткие дорожные одежды повышенной надежности к совместным транспортным и климатическим воздействиям : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11 / Е. М. Жуковский ; Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2025.

2 **Жуковский, Е. М.** Технологическая реализация применения вспенивающего эффекта битума при производстве асфальтобетонной смеси / заявители: Е. М. Жуковский, Д. Г. Игошкин, С. Е. Кравченко // Автомобильные дороги и мосты. – 2019. – № 1(23). – С. 19–24.

3 Патент BY 24473 C1. Способ устройства основания дорожной одежды из асфальтогранулята : № a 20230053 ; заявлено 16.02.2023/ заявители: Е. М. Жуковский, Я. А. Добрынович. – Опубл. 20.12.2024.

4 **Ma, X.** Probability Distributions of Asphalt Pavement Responses and Performance under Random Moving Loads and Pavement Temperature / X. Ma, L. Shangguan, C. Si // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 2. – P. 715.

5 **Otto, A.** The Impact of Drainage on the Performance of Low Volume Sealed Roads / A. Otto, J. Rolt, K. Mukura // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, № 15. – P. 6101.

6 **Retherford, J.** Q. Reliability Methods Applicable to Mechanistic-Empirical Pavement Design Method / J. Q. Retherford, M. McDonald // Transportation Research Record. – 2010. – Vol. 2154, № 1. – P. 130–137.

7 **Mohd Hasan, M. R.** A Comprehensive Review of Theory, Development, and Implementation of Warm Mix Asphalt Using Foaming Techniques / M. R. Mohd Hasan, Z. You, X. Yang // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 152. – P. 115–133.

8 Warm Mix Asphalt: An Overview / M. C. Rubio, G. Martínez, L. Baena, F. Moreno // Journal of Cleaner Production. – 2012. – Vol. 24. – P. 76–84.

9 Wirtgen Cold Recycling Technology. – Windhagen : Wirtgen GmbH, 2012. – 367 p.

УДК 625.142.44

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛИРУЮЩИХ РЕЛЬСОВЫХ СТЫКОВ

К. Л. ЗАГРАНИЧЕК, А. В. СУХОВ, А. В. САВИН, И. В. СВЕТОЗАРОВА
Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (*АО «ВНИИЖТ»*),
г. Москва, Российская Федерация

Изолирующий рельсовый стык является важным элементом железнодорожного пути, обеспечивающим безопасность движения поездов [1].

Анализ сети ОАО «РЖД» показал, что основной конструкцией изолирующих стыков является стык с композитными накладками (76 %), в то время как доля стыков с металлополимерными накладками составляет 19 %, а клееболтовых стыков – всего 5 %.

Опыт эксплуатации выявил проблемы изолирующих стыков с композитными накладками: их пониженная жесткость и несущая способность приводят к провисанию шпалы на принимающем конце рельса, образованию ступеньки на поверхности катания стыкуемых рельсов и, как следствие, росту динамических воздействий от подвижного состава [2].

Статистический анализ причин сходов поездов установил, что основная причина сходов, связанных с изломами рельсов, – это наличие трещин в шейке рельсов в зоне болтовых стыков (50 %). Причинами дефектов становятся низкое качество изготовления отверстий и отсутствие фасок, которые в сочетании с недостатками в текущем содержании пути приводят к просадкам, увеличению динамического воздействия, что вызывает многофрагментарное разрушение рельса и сход подвижного состава [3].

Несмотря на то, что композитные изолирующие стыки зарекомендовали себя как эффективное решение при внедрении в 90-х годах XX века, сегодня они занимают заметное место в статистике крушений из-за изломов рельсов. Двукратный рост грузонапряженности (особенно на Восточном полигоне за последние 20 лет), а также увеличение весовых норм и скоростей поездов требуют расширения использования других конструкций стыков для особо нагруженных маршрутов и внедрения дифференцированного подхода к их укладке [4].

Для оценки динамического воздействия на изолирующие стыки (с композитными, металлополимерными и клееболтовыми накладками) были проведены полигонные испытания: 24 проезда сцепа из 5 вагонов с осевой нагрузкой 23,5 тс при скоростях 5, 40 и 60 км/ч. Условия испытаний варьировались по величине зазора (8 и 22 мм), усилию затяжки болтов (600 и 1100 Нм), высоте вертикальных ступенек (до 2 мм) и сезону [5].

Анализ проведенных испытаний показал, что:

– максимальные напряжения возникают в нижней кромке всех типов изолирующих накладок и являются растягивающими;

– напряжения в композитной накладке изолирующего стыка увеличиваются при повышении скорости прохождения опытного сцепа и увеличении стыкового зазора;

– напряжения в металлополимерной и металлокомпозитной (в клееболтовом стыке) накладках уменьшаются при увеличении скорости прохождения опытного сцепа;

– максимальные напряжения, возникающие при проходе опытного сцепа по измерительному участку, определены в нижней кромке изолирующих накладок металлокомпозитного (клееболтового) стыка и составили 106,60 МПа в зимний период и 100,27 МПа в летний период при использовании типового болта и 108,51 МПа в зимний период, 107,30 МПа в летний при использовании высокопрочного болта;

– для композитной и металлической частей металлополимерной накладки в зимний период максимальные напряжения составили 77,30 и 102,30 МПа (при использовании типового болта) соответственно, 79,91 и 105,03 МПа (при использовании высокопрочного болта) соответственно. В летний период для этих типов стыков максимальные напряжения оказались на 10–15 % ниже при использовании типовых болтов и на 2–10 % ниже при использовании высокопрочных болтов: для композитной и металлической части металлополимерной накладки они составили 64,13 и

91,40 МПа (при использовании типовых болтов) соответственно, и 71,86 и 103,11 МПа (при использовании высокопрочных болтов) соответственно;

– для всех типов накладок отмечено уменьшение уровня максимальных напряжений, определенных в летний период, относительно аналогичных показателей, определенных в зимний период.

Уменьшение напряжений в стальной части металлополимерных и металлокомпозитных (в клееболтовом стыке) накладок при увеличении скорости движения определяется кинетикой движения колесных пар подвижного состава и их взаимодействия с рельсовой нитью в зоне болтового стыка. Чем выше скорость движения подвижного состава, тем меньше отклонение колеса в вертикальной плоскости в области межстыкового зазора и тем скоротечнее динамические процессы в болтовом стыке. Следствием этого является перераспределение энергии от взаимодействия колеса на стык в сторону увеличения диссипации (поглощения) энергии удара рельсом и уменьшения части энергии взаимодействия, воспринимаемой изолирующей накладкой.

Прямая зависимость величины напряжений, возникающих в изолирующем стыке с композитными накладками от скорости движения подвижного состава, объясняется меньшей, по сравнению с металлокомпозитным (клееболтовым) и металлополимерным изолирующими стыками, жёсткостью. В результате относительно небольшой её величины, при проезде колеса отдающий конец изолирующего стыка проседает и образуется ступенька, при взаимодействии колеса с которой возникают динамические нагрузки. Чем выше скорость движения подвижного состава, тем больше динамическое взаимодействие между колесом и принимающим концом изолирующего стыка с композитными накладками.

Были определены максимальные напряжения для каждого типа изолирующих накладок, прочностные характеристики материалов, из которых изготовлен каждый тип накладок, а также коэффициенты запаса прочности для каждого типа изолирующего стыка, рассчитанные как отношение временного сопротивления материала накладки к максимальным значениям напряжений, определенных в них в процессе полигонных испытаний.

Наименьший запас прочности имеет полимерный материал металлополимерной изолирующей накладки – 5,46. Из несущих конструкций наименьший запас прочности имеет композитная изолирующая накладка. Его значение в 1,14 раза меньше аналогичного показателя для металлокомпозитной накладки и в 1,18 раз меньше, чем значение для металлополимерной накладки.

Стоит отметить, что полимерный материал металлополимерной изолирующей накладки не несет функций несущей конструкции, однако его разрушение способствует нарушению электрической изоляции накладки, что делает накладку неработоспособной [6].

Список литературы

1 **Данилов, В. Н.** Расчет рельсовой нити в зоне стыка / В. Н. Данилов // Труды ЦНИИ МПС. – Вып. 70. – М. : Трансжелдориздат, 1952. – 115 с.

2 **Светозарова, И. В.** Металлополимерные накладки для изолирующих стыков рельсов : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.16.09 / И. В. Светозарова ; ВНИИЖТ. – М., 2011. – 26 с.

3 Определение ресурсных показателей твердосплавных пластин, применяющихся при изготовлении болтовых и технологических отверстий в рельсах, обеспечивающих их соответствие установленным требованиям / К. Л. Заграничек : отчет о НИР / АО «ВНИИЖТ»; науч. рук. К. Л. Заграничек. – М., 2024. – № 12.214.

4 **Ушаков, А. Е.** «АпАТэК» – внедрение изделий из полимерных композиционных материалов на линии метрополитенов / А. Е. Ушаков, В. Т. Семенов, Ю. Г. Кленин // Евразия Вести. – 2017. – № III. – С. 23.

5 Положение о порядке эксплуатации и проведении осмотров изолирующих стыков различных конструкций с учетом ресурсных показателей : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 23.05.2023 № 1253/р. – Введ. 23. 05.2023. – 46 с.

6 **Светозарова, И. В.** Изолирующие стыки с металлополимерными накладками / И. В. Светозарова // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2011. – № 1. – С. 40–43.

УДК 005.74:005.8:629.7

ОРГАНИЗАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НАУЧНО-ИНЖИНИРИНГОВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ КАК ФАКТОР БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Н. И. КАСПЕРОВИЧ, Ю. А. ШЕБЗУХОВ, В. Н. ГАРАНИН. С. А. ГОРОДНИК
ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Республика Беларусь

Развитие перспективных транспортно-инфраструктурных систем сопровождается не только усложнением технических решений, но и быстрым ростом организационной сложности. В реализации крупных научно-технологических программ одновременно участвуют различные подразделения, проектные команды, научные организации, промышленные предприятия и цифровые информационные системы. Для транспортно-инфраструктурных комплексов, построенных на новых архитектурных принципах, эта проблема дополнительно усиливается необходимостью согласованного решения конструкторских, инфраструктурных, информационных и эксплуатационных задач [1, 2]. Увеличение числа взаимосвязанных процессов и участников формирует дополнительный риск: управленческая система может сохранять формальную работоспособность, но постепенно утрачивать способность своевременно выявлять отклонения, перераспределять нагрузку и принимать решения в условиях изменяющейся обстановки.

В связи с этим возникает проблема оценки организационной устойчивости как одного из условий безопасности транспортной инфраструктуры. Традиционные показатели − численность персонала, объём документооборота, количество структурных подразделений − не всегда адекватно отражают реальную сложность цифровой организации. При развитии информационных систем часть управленческих взаимодействий переносится в цифровую среду, а увеличение числа формализованных процессов может происходить без пропорционального роста административного аппарата. Практика информационного моделирования при создании инновационных транспортно-инфраструктурных комплексов uST показывает, что цифровая модель может выступать не только инструментом проектирования, но и средой координации взаимодействия различных участников сложной инженерной задачи [2]. Поэтому необходимы показатели, характеризующие не только масштаб организации, но и структуру взаимодействий между процессами и их участниками.

В связи с этим эволюция бизнес-процессов рассматривается как один из возможных индикаторов организационной устойчивости научно-инжиниринговой организации. В основе подхода находится анализ взаимосвязи между количеством и структурой бизнес-процессов, составом участников, документооборотом, распределением процессной нагрузки и результатами исполнения задач. Такой подход позволяет перейти от оценки организации преимущественно по её ресурсному масштабу к оценке способности управленческой системы сохранять устойчивость при усложнении деятельности. Для сложных транспортных систем подобная постановка согласуется с необходимостью рассматривать безопасность как совокупность взаимосвязанных функций, а не только как характеристику отдельных технических элементов.

Если усложнение процессной архитектуры сопровождается одновременным сокращением традиционного документооборота и сохранением высокой доли исполнения задач, то возникает необходимость разделить организационную сложность и организационную неэффективность, так как увеличение количества процессов само по себе не означает ухудшения управления. Существенным становится вопрос о том, насколько равномерно распределена процессная нагрузка, существуют ли критические зависимости от отдельных участников и способна ли информационная система автоматически реагировать на возникающие отклонения. В этом контексте опыт разработки транспортных комплексов uST представляет интерес как пример системы, в которой безопасность связывается с формализацией функций и их модульным представлением.

Одной из ключевых проблем является формирование «бутылочных горлышек», когда существенная часть критически значимых процессов оказывается связана с ограниченным числом исполнителей. В такой ситуации отсутствие или перегрузка отдельного участника может привести к задержке связанных процессов и снижению устойчивости всей процессной цепочки. Дополнительный риск создают избыточные контуры согласования, при которых увеличение числа управленческих фильтров повышает длительность прохождения решений, не создавая сопоставимой дополнительной ценности. Для инновационных транспортных систем, где в единый комплекс

объединяются инфраструктура, подвижной состав, системы управления и эксплуатационные процессы, устранение подобных организационных зависимостей приобретает особое значение [1].

Для решения указанной проблематики предлагается развивать ролевую архитектуру организации. Она должна предусматривать не только закрепление ответственности, но и наличие механизмов замещения, горизонтального делегирования и автоматического перераспределения задач. Критически важные процессы целесообразно проектировать таким образом, чтобы их выполнение не зависело от единственного исполнителя или единственной точки принятия решения. Это требует регулярного анализа фактической загрузки участников и выявления процессов с высокой степенью организационной концентрации. При создании цифровых моделей сложных транспортно-инфра-структурных комплексов аналогичный принцип может распространяться на связку проектных ролей, информационных объектов и процедур согласования [2].

Второе направление связано с переходом от преимущественно статической модели согласований к динамическому управлению процессами. Информационная система должна фиксировать отклонения от регламентных параметров и инициировать предусмотренную правилами эскалацию, перераспределение или изменение маршрута задачи. Одновременно необходимо дифференцировать процессы по критичности и устанавливать приоритеты, позволяющие концентрировать управленческие ресурсы на задачах, непосредственно влияющих на безопасность, сроки и результаты проекта. Для транспортных систем с принципиально новой архитектурой такой подход особенно важен, поскольку функции безопасности требуют явной формализации и последующей проверки их реализации.

Третье направление заключается в формировании системы постоянного мониторинга организационной устойчивости. Наряду с традиционными показателями исполнительской дисциплины целесообразно отслеживать концентрацию процессов на отдельных участниках, количество последовательных точек согласования, длительность прохождения сквозных процессов, частоту эскалаций и способность системы обеспечивать замещение критических ролей. Совокупность таких характеристик может стать основой для интегрального показателя цифровой организационной ёмкости. При этом сама идея должна рассматриваться как предмет дальнейшей эмпирической проверки, а не как уже установленный универсальный критерий.

Для крупных транспортных и инфраструктурных программ принципиальное значение имеет также масштабирование предложенного подхода. При переходе от отдельной организации к распределённой системе взаимодействия возникают дополнительные контуры − межорганизационные, территориальные, отраслевые и международные. Поэтому модель организационной устойчивости должна учитывать не только внутреннюю процессную архитектуру, но и надёжность связей между независимыми организационными контурами. Это особенно актуально для транспортно-инфраструктурных решений uST, рассматриваемых как комплекс, включающий путевую структуру, транспортные модули и инфраструктурные элементы [3]. В таком случае безопасность следует рассматривать не только как свойство технической системы, но и как свойство организационной системы, обеспечивающей её разработку, интеграцию и эксплуатацию.

Таким образом, проблематика организационной безопасности перспективных транспортных систем заключается в необходимости сохранять управляемость при постоянно возрастающей сложности процессов, участников и информационных взаимодействий. Предлагаемый подход предполагает переход от оценки организации по отдельным ресурсным показателям к системному мониторингу процессной архитектуры, распределения ответственности и устойчивости информационных контуров. Дальнейшие исследования должны быть направлены на эмпирическую проверку предложенных показателей, определение пороговых значений организационных рисков и разработку методов автоматизированного выявления критических зависимостей в процессных системах.

Список литературы

1 **Юницкий, А. Э.** Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе: научное издание / А. Э. Юницкий. – Силакрогс : ПНБ принт, 2019. – 576 с.

2 Особенности использования информационного моделирования в проектировании и строительстве инновационных транспортно-инфраструктурных комплексов UST / А. Э. Юницкий, А. Ю. Кабаков, А. Г. Кошелев, В. Н. Гаранин // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 2 (131). – С. 97–102. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-131-2-97-102.

3 **Юницкий, А. Э.** О перспективах развития струнного транспорта для грузовых перевозок / А. Э. Юницкий, Д. Н. Тихонов, М. И. Цырлин // Транспортные и транспортно-технологические системы страны, её регионов и городов, организация производства на транспорте. – 2021. – № 3. – С. 7–10. – DOI: 10.20291/2311-164X-2021-3-7-10.

УДК 625.7

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Е. А. КОНДРАШИН
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель
ООО «ЖелДорСтрой», г. Великий Новгород, Российская Федерация

Безопасность автомобильной дороги формируется не только в процессе ее эксплуатации, но и непосредственно на стадии строительства. Качество выполнения земляных работ, устройства дорожных конструкций, водоотвода и других элементов определяется точностью соблюдения проектных решений и технологических требований. Отклонения геометрических параметров, отметок и уклонов, допущенные в процессе строительства, могут привести к снижению эксплуатационных характеристик дороги и отрицательно повлиять на безопасность движения. В связи с этим особую значимость приобретает применение цифровых технологий, позволяющих повысить точность измерений, оперативность контроля и достоверность получаемой информации.

Одним из основных направлений цифровизации дорожного строительства является применение спутниковых навигационных систем и электронных тахеометров. GNSS-технологии позволяют оперативно определять пространственное положение объектов, выполнять геодезическую разбивку, контролировать плановое и высотное положение конструктивных элементов дороги. Электронные тахеометры обеспечивают точное измерение координат и превышений, что особенно важно при выполнении ответственных разбивочных и исполнительных работ. Полученные координатные и высотные данные могут использоваться для актуализации цифровой модели объекта и последующего сопоставления фактических параметров с проектными.

Важным преимуществом цифрового подхода является возможность выявлять отклонения на ранних стадиях строительства. При выполнении исполнительной геодезической съемки фактические координаты и отметки представляются в цифровом виде и сравниваются с проектными значениями. Это позволяет своевременно обнаруживать отклонения положения оси дороги, отметок земляного полотна, продольных и поперечных уклонов, границ конструктивных слоев и других параметров. Раннее выявление несоответствий дает возможность устранить их до перехода к следующему технологическому этапу, снижая вероятность накопления строительных ошибок.

Значительные возможности предоставляет применение трехмерного моделирования и цифровых моделей автомобильных дорог. На основе проектных данных формируется пространственная модель, содержащая информацию о плановом положении трассы, продольном и поперечном профилях, проектных отметках и геометрии отдельных конструктивных элементов. При наличии фактических геодезических данных становится возможным сравнение проектной и построенной поверхностей. Такой подход позволяет не только визуализировать отклонения, но и рассматривать объект как единую пространственную систему, в которой положение земляного полотна, дорожной одежды, водоотводных сооружений и других элементов должно соответствовать взаимосвязанным проектным требованиям.

Особое значение цифровое моделирование приобретает при выполнении земляных работ. Сопоставление проектной поверхности с фактической дает возможность контролировать правильность формирования земляного полотна, соблюдение проектных отметок и уклонов, а также оценивать объемы выполненных работ. Перспективным направлением является интеграция цифровой модели с системами машинного управления дорожно-строительной техникой. Передача проектной поверхности или проектных отметок непосредственно в систему управления позволяет сократить количество ручных операций при планировке, разработке и перемещении грунта, а также при формировании проектного профиля. Это способствует снижению вероятности недобора или перерасхода грунта и уменьшает количество последующих корректирующих операций.

При выполнении работ машинное управление позволяет контролировать положение рабочего органа строительной машины относительно проектной поверхности. Повышение точности формирования насыпи, выемки и других элементов земляного полотна непосредственно влияет на соот-

ветствие фактических параметров проектным решениям. Результаты такой работы могут дополнительно проверяться исполнительной геодезической съемкой, что формирует последовательность «цифровая модель – выполнение работ – контроль – корректирующие мероприятия». Сочетание автоматизированного управления и независимого геодезического контроля позволяет повысить стабильность качества строительных процессов и уменьшить влияние человеческого фактора.

Цифровой контроль может применяться не только при формировании земляного полотна, но и при устройстве конструктивных слоев дорожной одежды. Исполнительные измерения позволяют проверять положение и высотные отметки слоев, контролировать проектные толщины и уклоны, а также своевременно выявлять отклонения до перехода к последующим операциям. Это снижает вероятность накопления ошибок в конструкции дороги и повышает надежность выполнения технологических процессов.

Еще одним инструментом цифрового контроля являются беспилотные летательные аппараты и фотограмметрические технологии. С их помощью можно оперативно получать данные о состоянии строительной площадки, формировать цифровые модели местности и контролировать ход выполнения работ. Периодическая съемка позволяет сравнивать фактическое состояние объекта с проектными решениями, выявлять изменения геометрии и уточнять объемы выполненных работ. На протяженных объектах применение беспилотных систем может дополнить наземные измерения и повысить оперативность получения информации, однако достоверность результатов зависит от качества исходной геодезической основы и обработки данных.

Для обеспечения безопасности важна не только скорость получения цифровых данных, но и их согласованность во времени и пространстве. Проектные и исполнительные материалы должны формироваться в единой системе координат и быть связаны с конкретным участком дороги и выполненной операцией. Это позволяет сопоставлять результаты контроля, исключать противоречия между данными и повышать достоверность инженерных решений. При выявлении отклонений можно определить связанный с ним этап работ и принять решение о повторном измерении, корректировке или дополнительном обследовании.

Наиболее высокий эффект достигается при комплексном использовании цифровых технологий. Геодезические системы обеспечивают получение точных пространственных данных, трехмерное моделирование представляет проектные решения в цифровом виде, машинное управление способствует их непосредственной реализации на строительной площадке, а исполнительная съемка и фотограмметрия обеспечивают контроль фактического результата. Накопление результатов измерений и выполненных работ в цифровом виде позволяет сохранять информацию по отдельным участкам дороги и использовать ее на последующих этапах строительства. Такой подход повышает прослеживаемость контроля качества и позволяет оперативнее принимать инженерные решения.

Таким образом, применение цифровых технологий при строительстве автомобильных дорог является одним из эффективных направлений повышения качества и безопасности транспортной инфраструктуры. Использование GNSS и электронных тахеометров, трехмерного моделирования, систем машинного управления, беспилотных летательных аппаратов и цифровой исполнительной документации позволяет повысить точность выполнения проектных решений, своевременно выявлять отклонения и обеспечить более объективный контроль строительных процессов. Наиболее эффективным является комплексное применение указанных технологий, при котором цифровая информация сопровождает объект от проектной модели до выполнения работ и исполнительного контроля. Это позволяет снизить вероятность формирования дефектов и создать более надежную основу для безопасной эксплуатации автомобильной дороги.

Список литературы

1 **Царенкова, И. М.** Возможности цифровой трансформации дорожного хозяйства / И. М. Царенкова // Вестник НГИЭИ. – 2020. – № 6 (109). – С. 57–64.

2 **Карпович, В. Ф.** Цифровые платформы для повышения эффективности автодорожных проектов в Республике Беларусь / В. Ф. Карпович, Э. К. Нестеренко // Актуальные исследования. – 2025. – № 44 (279). Ч. II. – С. 75–80.

3 К вопросу о создании цифрового двойника для строительства автомобильной дороги / А. Е. Акимов, С. Н. Бондаренко, А. Н. Бодяков, А. В. Курлыкина // Системные технологии. – 2023. – № 4 (49). – С. 25–34..

УДК 625.11

ОПТИМИЗАЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ КРИВЫХ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ BIM

Л. П. КОНОНОВИЧ
Белорусская железная дорога, г. Витебск

Приводится применение Building Information Modeling (BIM), что означает объектно-ориентированную модель строительного объекта или комплекса строительных объектов в трёхмерном виде, с элементами которой связаны данные геометрических, физических и функциональных характеристик строительного объекта для оптимизации содержания кривых участков железнодорожного пути. Рассмотрим, как BIM может использоваться на различных этапах жизненного цикла железнодорожной инфраструктуры, от проектирования до эксплуатации и обслуживания. А также рассмотрим конкретные примеры успешного применения BIM на железных дорогах по всему миру. BIM в проектировании кривых участков: повышение точности и снижение рисков. При этом точное моделирование геометрии пути BIM позволяет создать 4D-модель (3D + время), отображающую последовательность строительных работ. Это облегчает планирование и контроль за ходом строительства.

Оптимизация профиля и плана: с помощью BIM можно проводить анализ различных вариантов профиля и плана кривого участка, выбирая оптимальное решение с точки зрения безопасности, комфорта движения и эксплуатационных расходов. Выявление и предотвращение коллизий BIM: позволяет выявить коллизии между элементами железнодорожного пути и другими инженерными коммуникациями еще на этапе проектирования, что снижает риски возникновения проблем при строительстве. Проектирование новых железнодорожных линий: BIM используется для оптимизации трассы, минимизации земляных работ, проектирования мостов и тоннелей.

Примеры: высокоскоростные магистрали в Европе и Азии (например, проекты в Германии, Франции, Китае). Реконструкция и модернизация существующих железнодорожных линий: BIM помогает в планировании работ, управлении строительством и координации различных подрядчиков. Реконструкция ж.-д. путей в густонаселенных районах, где требуется минимизировать воздействие на окружающую среду и транспортную инфраструктуру.

BIM в строительстве представляет контроль качества и сокращение сроков. Визуализация строительного процесса BIM позволяет создать 4D-модель (3D + время), отображающую последовательность строительных работ. Это облегчает планирование и контроль за ходом строительства. Контроль качества выполняемых работ: BIM обеспечивает возможность сопоставления фактических параметров построенного участка с проектными данными, что повышает качество строительства и предотвращает отклонения. Благодаря улучшенной координации и контролю BIM помогает сократить сроки строительства и снизить затраты.

BIM в эксплуатации и обслуживании – это повышение эффективности и снижение затрат. BIM интегрируется с системами мониторинга состояния пути, позволяя отслеживать изменения геометрии, выявлять дефекты и прогнозировать необходимость ремонта. При планировании ремонтных работ BIM предоставляет информацию, необходимую для ремонтных работ, определения объемов и ресурсов, а также оптимизации сроков проведения работ. А также BIM используется для управления активами железнодорожной инфраструктуры, обеспечивая полный учет всех элементов пути, их характеристик и истории обслуживания.

Интеграция BIM с другими технологиями: создание «умной» железной дороги.

1 Интернет вещей (IoT): датчики IoT передают данные о состоянии пути в BIM-модель, обеспечивая мониторинг в режиме реального времени.

2 Геоинформационные системы (ГИС): ГИС предоставляет географический контекст для BIM-модели, позволяя учитывать факторы окружающей среды.

3 Искусственный интеллект (ИИ): ИИ анализирует данные из BIM и IoT, прогнозируя возникновение дефектов и оптимизируя планы обслуживания.

Примеры успешного применения BIM на железных дорогах.

BIM используется при проектировании и строительстве высокоскоростных магистралей для обеспечения высокой точности и безопасности. Помогает оптимизировать строительство и эксплуа-

тацию метрополитенов в условиях плотной городской застройки. BIM обеспечивает точное моделирование сложных конструкций железнодорожных мостов, повышая их надежность. Используется BIM для строительства новых станций и вокзалов в крупных городах Москва, Санкт-Петербург; Crossrail (Великобритания) – для проектирования и строительства нового тоннеля под Лондоном; Gotthard Base Tunnel (Швейцария) – применение BIM для управления огромным объемом данных и координации строительства одного из самых длинных тоннелей в мире; Berlin Hauptbahnhof (Германия) – BIM использовался для координации строительства сложного многоуровневого вокзала в центре Берлина.

Проблемы и перспективы внедрения BIM на Белорусской железной дороге.

Проблемы заключаются в отсутствии единой нормативно-правовой базы и стандартов BIM. Решение: разработка и утверждение национальных стандартов BIM, адаптированных к специфике железнодорожной отрасли Беларуси. При этом можно использовать опыт других стран (например, Великобритании, Германии, России), но адаптировать стандарты к местным условиям.

Высокая стоимость внедрения. Решение: поэтапное внедрение BIM, начиная с небольших пилотных проектов; государственная поддержка и субсидирование внедрения BIM на приоритетных проектах Бел. ж. д.; разработка и использование отечественного программного обеспечения BIM

Недостаток квалифицированных кадров. Решение: разработка и внедрение учебных программ по BIM в вузах и колледжах, готовящих специалистов для Бел. ж. д.; организация курсов повышения квалификации и переподготовки персонала Бел. ж. д.; привлечение иностранных экспертов для обучения и консультаций.

Организационные и культурные барьеры. Решение: обучение и информирование персонала о преимуществах BIM; вовлечение сотрудников в процесс внедрения BIM; создание рабочих групп и центров компетенций по BIM.

Проблемы интеграции BIM с существующими информационными системами. Решение: разработка стратегии интеграции BIM с существующими информационными системами; использование открытых форматов данных и стандартов обмена информацией; модернизация существующих информационных систем для обеспечения совместимости с BIM.

В перспективах повышение эффективности проектирования и строительства новых железнодорожных линий и объектов: BIM позволяет оптимизировать трассу пути, минимизировать объемы земляных работ, повысить точность смет и сократить сроки строительства. Применение BIM может снизить затраты на строительство и повысить качество объектов.

Оптимизация управления жизненным циклом существующей инфраструктуры: BIM позволяет создавать цифровые модели существующих объектов инфраструктуры, которые используются для планирования и выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту. Это может привести к снижению затрат на содержание инфраструктуры и повышению ее надежности.

Улучшение безопасности железнодорожного движения: BIM позволяет выявлять потенциальные риски и опасности на этапе проектирования и строительства, что способствует повышению безопасности железнодорожного движения. BIM также может использоваться для мониторинга состояния инфраструктуры и своевременного выявления дефектов.

Повышение прозрачности и эффективности управления проектами: BIM обеспечивает централизованное хранение и управление всей информацией о проекте, что повышает прозрачность и улучшает контроль за ходом работ. BIM позволяет отслеживать затраты и сроки выполнения работ, что способствует эффективному управлению проектами.

Развитие инноваций и конкурентоспособности: внедрение BIM позволит Бел. ж. д. использовать современные технологии и повысить свою конкурентоспособность на международном рынке транспортных услуг. BIM может стать основой для разработки новых сервисов и продуктов для клиентов Бел. ж. д.

Основные выводы и дальнейшие шаги: BIM является эффективным инструментом для оптимизации содержания кривых участков железнодорожного пути, позволяющим повысить точность проектирования, улучшить качество строительства и снизить эксплуатационные расходы.

Внедрение BIM на Белорусской железной дороге – сложный, но перспективный процесс, который может принести значительные выгоды. Успех этого процесса зависит от совместных усилий государства, предприятий Бел. ж. д., научных организаций и IT-компаний. Важно учитывать как проблемы, так и перспективы внедрения BIM, чтобы разработать эффективную стратегию и реали-

зовать потенциал этой технологии в полной мере. Для внедрения BIM на Белорусской железной дороге необходимо разработать нормативную базу, повысить квалификацию специалистов и усилить государственную поддержку.

УДК 625.1

АНАЛИЗ ПУТЕВОГО ХОЗЯЙСТВА БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ, ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

С. В. КОРИК
Белорусская железная дорога, г. Минск

П. В. КОВТУН
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Одним из важнейших хозяйств, от которых зависит работоспособность всей железной дороги, является путевое хозяйство. От его состояния, мощности обустройств в значительной степени зависят пропускная способность дороги, безопасность и допускаемые скорости движения поездов.

На сегодняшний день путевое хозяйство Белорусской железной дороги – это более 11,6 тыс. км железнодорожных путей, из которых более 7,2 тыс. км – главные железнодорожные пути, почти 12 тыс. стрелочных переводов, 1,7 тыс. железнодорожных переездов и 1,9 тыс. мостов и путепроводов. Главные железнодорожные пути уложены на железобетонном основании на 98,7 % от их общей протяженности, а рельсовые плети бесстыкового пути уложены на 67,9 % от протяженности главных железнодорожных путей.

Содержание путевого хозяйства и ремонт железнодорожных магистралей обеспечивают 27 предприятий, в том числе 20 дистанций пути, 6 дистанций защитных лесонасаждений, государственное предприятие «Ремпуть Белорусской железной дороги», в которых трудится шестая часть работников железнодорожного транспорта.

В последние годы функционирование и развитие путевого комплекса находится под влиянием ряда сдерживающих факторов, оказывающих существенное влияние на организацию и планирование работ, а также требующих изменения применяемых технологий и структурных преобразований.

К основным сдерживающим факторам можно отнести нехватку обслуживающего персонала, недостаточное финансирование ремонтных программ и закупки новых материалов верхнего строения пути, высокий процент физического износа специального железнодорожного подвижного состава и автотракторной техники, а также их моральное старение.

С целью компенсации их негативного воздействия на путевое хозяйство и обеспечения эффективной и устойчивой его работы, поддержания надежного и технически исправного состояния путевой инфраструктуры, гарантирующего безопасность движения поездов, реализуется Стратегия устойчивого развития путевого хозяйства Белорусской железной дороги до 2030 года.

Приоритетными направлениями развития путевого хозяйства на сегодняшний день являются следующие:

– совершенствование конструкции;

– повышение надежности работы и усиление железнодорожного пути и искусственных сооружений за счет увеличения доли железнодорожных путей и стрелочных переводов на железобетонном основании; расширения полигона укладки бесстыкового пути, в том числе на станционных путях; увеличения длины рельсовых плетей путем ликвидации уравнительных пролетов и применения клееболтовых изолирующих стыков; расширения полигона укладки малообслуживаемых конструкций железнодорожного пути, применения в кривых участках пути новых категорий рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости;

– уход от криволинейных стрелочных переводов нетиповых конструкций;

– своевременный капитальный ремонт искусственных сооружений;

– совершенствование нормативно-технической базы, регламентирующей систему ведения путевого хозяйства, организацию работ по текущему содержанию при внедрении новых технологий, а также при работе в условиях кадрового дефицита;

– укрепление материально-технической базы путевого хозяйства и усиление путевой железнодорожной инфраструктуры, включая ремонт железнодорожных путей и искусственных сооружений, обновление морально устаревшего и физически изношенного специального железнодорожного подвижного состава и автотракторной техники, закупку аккумуляторного путевого инструмента, в том числе для обеспечения мобильности путевых бригад в условиях увеличения зоны обслуживания и нехватки кадров.

Продолжается работа по поэтапному переходу на технологию машинизированного текущего содержания железнодорожного пути. На текущий год предусмотрен пересмотр административного деления малоинтенсивных участков Белорусской железной дороги с оснащением обслуживающих бригад автомобилями повышенной проходимости и путевым инструментом. В период с 2027 по 2029 год планируется пересмотреть административное деление и подготовить основу для перехода на указанную технологию на всех участках дистанций пути.

При этом полноценный переход на технологию машинизированного текущего содержания будет возможен только после оснащения централизованных стрелочных переводов технологическим подогревом с системой дистанционного управления, диагностики и мониторинга, а также закупки высокопроизводительной путевой техники в соответствии с Программой поэтапного перевода дистанций пути отделений Белорусской железной дороги на технологию машинизированного текущего содержания пути на 2026–2030 годы. На сегодняшний день ведется поиск наиболее приемлемых вариантов закупки специального железнодорожного подвижного состава, соответствующего требованиям Белорусской железной дороги.

Актуальным остается вопрос оптимизации расходов за счет применения ресурсосберегающих и инновационных технологий, максимального применения технологий восстановления рельсов и металлических элементов стрелочных переводов, продления срока службы элементов верхнего строения пути.

С целью наиболее эффективного управления работой путевого хозяйства на современном этапе предусматривается постоянный мониторинг и оценка результатов соответствующих программных документов на предмет их актуализации и, при необходимости, своевременной корректировки.

УДК 625.7/.8

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

А. В. КОРОНЧИК, А. А. АФАНАСЕНКО
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Обеспечение безопасности дорожного движения является одним из ключевых приоритетов государственной транспортной политики. Наличие колейности, ямочности, сетки трещин, а также низкий коэффициент сцепления шин с поверхностью проезжей части существенно увеличивают тормозной путь транспортных средств и снижают управляемость, особенно в сложных метеорологических условиях. В связи с этим поиск и внедрение современных, эффективных и долговечных технологических решений в области строительства, реконструкции и ремонта асфальтобетонных покрытий приобретает важность не только для экономики, но и для сохранения жизни и здоровья участников дорожного движения.

Современные тенденции развития асфальтобетонных покрытий неразрывно связаны с инновационными подходами к модификации материалов и рациональному проектированию дорожных одежд. Одним из наиболее перспективных направлений повышения надежности является использование наномодификаторов. Их внедрение в структуру битумного вяжущего позволяет существенно оптимизировать реологические свойства асфальтобетона, улучшая сопротивление материала трещинообразованию при низких температурах и колееобразованию при высоких эксплуатационных нагрузках (рисунок 1) [1]. Формирование устойчивой наноструктуры в вяжущем напрямую способствует увеличению срока службы покрытия и минимизации возникновения дефектов, являющихся непосредственными факторами риска возникновения аварийных ситуаций.



Рисунок 1 – Пример накопления дефектов различного характера на асфальтобетонном покрытии

Дополнительным резервом повышения сдвигоустойчивости и общей долговечности дорожных конструкций выступает оптимизация состава смесей. Анализ современных методов стабилизации асфальтобетонных смесей с повышенным содержанием вяжущего демонстрирует, что такой подход обеспечивает формирование более толстых и прочных пленок битума вокруг минеральных зерен [2]. Это критически важно для улучшения водостойкости и устойчивости к сдвиговым нагрузкам на участках с интенсивным движением тяжелого грузового транспорта, таких как перекрестки, остановки общественного транспорта и зоны разгона-торможения. Предотвращение образования колеи на таких участках позволяет водителям сохранять стабильную траекторию движения и адекватно реагировать на изменения дорожной обстановкиДополнительным резервом повышения сдвигоустойчивости и общей долговечности дорожных конструкций выступает оптимизация состава смесей. Анализ современных методов стабилизации асфальтобетонных смесей с повышенным содержанием вяжущего демонстрирует, что такой подход обеспечивает формирование более толстых и прочных пленок битума вокруг минеральных зерен [2]. Это критически важно для улучшения водостойкости и устойчивости к сдвиговым нагрузкам на участках с интенсивным движением тяжелого грузового транспорта, таких как перекрестки, остановки общественного транспорта и зоны разгона-торможения. Предотвращение образования колеи на таких участках позволяет водителям сохранять стабильную траекторию движения и адекватно реагировать на изменения дорожной обстановки.

Помимо совершенствования материаловедческих подходов, неотъемлемой частью концепции безопасной дороги является рациональное проектирование. Внедрение конструктивных решений с разнопрочной дорожной одеждой по ширине проезжей части позволяет дифференцированно подходить к распределению транспортных нагрузок [3]. Усиление наиболее напряженных зон, например, полос наката и зон торможения, а также использование менее прочных, но более экономичных материалов на обочинах или разделительных полосах для защиты от насыщения дорожной одежды влагой, не только продлевает межремонтный срок службы покрытия, но и выступает значимым элементом достижения целей устойчивого развития. Такой подход обеспечивает экономию материальных ресурсов и снижение углеродного следа при строительстве, одновременно повышая надежность именно там, где риски ДТП повышены.

Однако даже самые совершенные конструктивно-материаловедческие решения требуют своевременного и качественного обслуживания в процессе эксплуатации. Оперативность устранения локальных дефектов напрямую влияет на непрерывность и безопасность транспортного потока. Применение современных высокотехнологичных ремонтных материалов для быстрого устранения ямочности обеспечивает оперативное восстановление ровности покрытия [4]. Использование таких материалов минимизирует время закрытия полос движения для проведения ямочного ремонта, что снижает риски возникновения заторов и вторичных дорожно-транспортных происшествий в зонах производства работ, которые традиционно являются участками повышенной опасности.

Таким образом, комплексное применение современных материалов и конструктивных подходов позволит достичь качественно новых показателей безопасности дорожного движения. Повышение сдвигоустойчивости предотвращает образование колеи, улучшение трещиностойкости снижает

риск появления ям, а поддержание ровности дорожного покрытия сокращает излишние маневрирования транспортными средствами. Реализация данных подходов на практике позволит обеспечить принципиально новый, более высокий уровень безопасности для всех участников дорожного движения, снижая эксплуатационные затраты и полностью соответствуя глобальным задачам устойчивого развития транспортной сети.

Список литературы

1 Mechanoactivated hybrid nanomodifiers for increasing the operational reliability of asphalt concrete / S. A. Zhdanok, P. P. Samtsov, P. P. Yatsevich, A. A. Afanasenka // Journal of Materials and Engineering Structures «JMES». – 2026. – Vol. 13, № 4. – P. 651–666.

2 **Afanasenka, A. A.** Analytical review of methods for stabilizing asphalt concrete mixtures with increased binder content / A. A. Afanasenka, P. P. Yatsevich, A. V. Koronchik // Bulletin of Civil Engineers. – 2024. – № 3 (104). – P. 59–70. – DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-3-59-70.

3 **Жуковский, Е. М.** Разнопрочная дорожная одежда по ширине проезжей части автомобильной дороги как элемент достижения целей устойчивого развития / Е. М. Жуковский, А. В. Корончик, С. Е. Кравченко // Устойчивое развитие в условиях глобальных вызывов : сб. науч. ст. междунар. конф., Санкт-Петербург, 6–8 июня 2022 г. – СПб. : С.-Петерб. гос. экон. ун-т, 2022. – С. 96–103. – EDN ZJZSSC.

4 Современный ремонтный материал для устранения ямочности на дорожных покрытиях / Е. М. Жуковский, А. В. Корончик, С. Е. Кравченко, Д. В. Глинский // Минск – Шанхай – Чанчунь: стратегия прорывного сотрудничества : сб. материалов науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апр. 2022 г. / М-во образования Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, Республиканское инновационное унитарное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник». – Минск : БНТУ, 2022. – С. 122–124. – EDN QHQGSF.

УДК 625.841

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ЗА СЧЕТ МОДИФИКАЦИИ ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА ОТХОДАМИ ВОДОПОДГОТОВКИ

А. В. КОРОНЧИК, Н. С. ГУРИНЕНКО
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Безопасность дорожного движения неразрывно связана с эксплуатационной надежностью дорожной одежды. Появление трещин, выбоин, колейности и шелушения покрытия напрямую снижает сцепные качества шин, увеличивает тормозной путь и создает аварийно-опасные ситуации, требующие оперативного вмешательства [1]. В условиях частых переходов температуры через 0 °С традиционные дорожные покрытия (асфальтобетонные или цементобетонные) подвержены ускоренной деградации из-за проникновения влаги в микротрещины и последующего разрушения при циклах замораживания-оттаивания. Обеспечение высокой эксплуатационной надежности дорожных конструкций является приоритетной задачей, что подтверждается современными исследованиями в области модификации дорожных материалов [2].

Одним из перспективных путей решения этой задачи является модификация цементного бетона высокодисперсным карбонатным шламом – отходом станций химводоподготовки ТЭЦ, теоретические и практические факторы применения которого в дорожном строительстве были ранее обоснованы в работах автора [3, 4]. Целью данной работы стала оценка влияния данной добавки на технологические свойства смесей и кинетику прочности в направлении повышения качества и безопасности дорожных покрытий.

Ключевым фактором, влияющим на конечное качество дороги, является технология укладки цементного бетона. Устройство монолитных покрытий на удаленных участках часто осложняется быстрой потерей подвижности смеси. Экспериментально установлено, что введение карбонатного шлама (10–20 % от массы цемента) замедляет сроки схватывания на 20–60 минут. Данный эффект обусловлен увеличением индукционного периода гидратации и, вероятно, временным связыванием свободной влаги тонкодисперсной фазой.

Практическая значимость для безопасности заключается в расширении «технологического окна», которое позволит получить более качественную смесь на месте укладки, обеспечивая высокую однородность и ровность покрытия. Замедление структурообразования также снижает риск образования ранних усадочных микротрещин, которые могут оказать сильное влияние на риск разрушения дорожного покрытия в зимний период.

Для оценки несущей способности были запроектированы составы цементного бетона с постоянным расходом воды (175 л/м³): контрольный (без добавки), с замещением 10 % цемента шламом и с введением 10 % шлама сверх массы вяжущего (в качестве микронаполнителя).

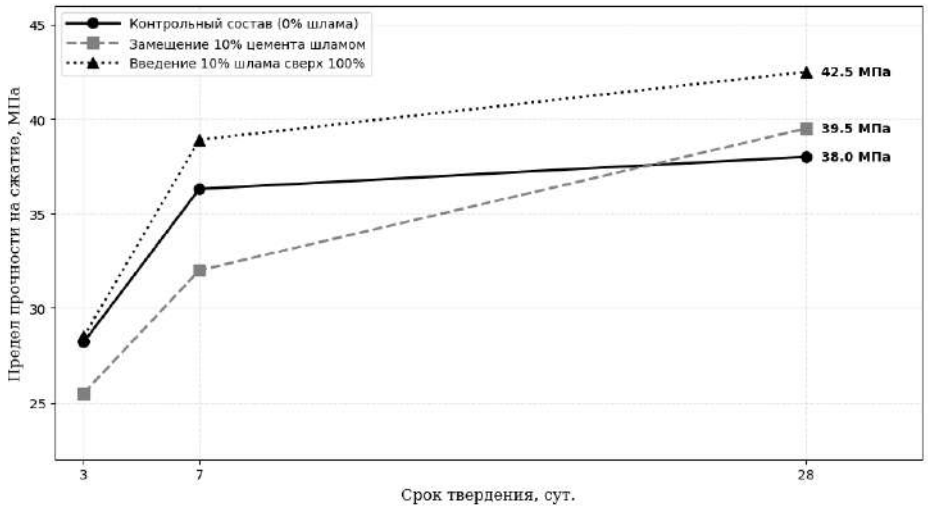


Рисунок 1 – Кинетика набора прочности на сжатие цементного бетона, модифицированного карбонатным шламом водоподготовки

В раннем возрасте (3–7 суток) состав с замещением демонстрирует прогнозируемое снижение прочности из-за «разбавления» клинкера. Однако к 28 суткам происходит полная компенсация, и прочность состава с замещением на 3,9 % выше контроля, а при введении шлама в качестве добавки прирост составляет 11,8 %.

Повышение прочности объясняется тем, что тонкодисперсные частицы шлама заполняют межзерновое пространство и капиллярные поры, уплотняя структуру цементного камня. С точки зрения безопасности на дороге, это может предоставить критически важный эффект, такой как снижение водопроницаемости и повышение морозостойкости, так как плотная микроструктура блокирует капиллярный подсос воды, что согласуется с ранее установленным положительным влиянием данной добавки на снижение водопоглощения и повышение морозостойкости цементного бетона [4].

Проведенные исследования позволили оценить влияние тонкодисперсного карбонатного шлама водоподготовки на кинетику формирования прочности цементного бетона. Дополнительно полученные данные позволили установить, что тонкодисперсная структура частиц шлама обуславливает его повышенную водопотребность по сравнению с портландцементом, что приводит к нелинейному росту нормальной густоты цементного теста при увеличении доли добавки в системе. Расширение технологического окна укладываемости бетонной смеси позволит отказаться от применения дополнительных химических замедлителей при устройстве монолитных дорожных покрытий. Практическая ценность работы заключается в возможности снижения расхода клинкерного вяжущего на 35 кг/м³ бетонной смеси при сохранении и некотором улучшении физико-механических характеристик цементного бетона. Совокупность технологических и эксплуатационных эффектов, таких как замедление схватывания, уплотнение микроструктуры, повышение морозостойкости, напрямую способствует увеличению долговечности дорожных покрытий и снижению риска образования дефектов, напрямую влияющих на безопасность дорожного движения. Дополнительным преимуществом предлагаемой технологии является вовлечение крупнотоннажного техногенного отхода в хозяйственный оборот, что соответствует принципам ресурсосбережения и снижения углеродного следа строительной отрасли [5].

Список литературы

1 Современный ремонтный материал для устранения ямочности на дорожных покрытиях / Е. М. Жуковский, А. В. Корончик, С. Е. Кравченко, Д. В. Глинский // Минск – Шанхай – Чанчунь: стратегия прорывного сотрудничества : сб. материалов науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апр. 2022 г. / М-во образования Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, Республиканское инновационное унитарное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник». – Минск : БНТУ, 2022. – С. 122–124. – EDN QHQGSF.

2 Mechanoactivated hybrid nanomodifiers for increasing the operational reliability of asphalt concrete / S. A. Zhdanok, P. P. Samtsov, P. P. Yatsevich, A. A. Afanasenka // Journal of Materials and Engineering Structures «JMES». – 2026. – Vol. 13, № 4. – P. 651–666.

3 Состав и свойства цементобетонных смесей для дорожного строительства с использованием тонкодисперсных отходов ТЭЦ / А. В. Корончик, Е. М. Жуковский, С. Е. Кравченко, О. В. Гайдук // Автомобильные дороги и мосты. – 2022. – № 1 (29) – С. 71–81.

4 **Корончик, А. В.** Влияние добавления тонкодисперсных отходов ТЭЦ на водопоглощение и морозостойкость бетонов для дорожного строительства / А. В. Корончик, Е. М. Жуковский, С. Е. Кравченко // Автомобильные дороги и мосты. – 2024. – № 2 (34) – С. 64–71.

5 **Корончик, А. В.** Минеральные добавки как инструмент снижения углеродного следа в производстве дорожных бетонов / А. В. Корончик, Н. С. Гуриненко // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы V Междунар. науч.-техн. конф., 18–19 дек. 2025, г. Минск / сост.: Е. М. Жуковский, О. Б. Дрозд, Л. А. Кирилов, А. А. Кошелева. – Минск : БНТУ, 2026. – С. 318–320.

УДК 625.7/.8

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ МЕСТНЫХ ПРОЕЗДОВ И ПОДЪЕЗДНЫХ ДОРОГ ПУТЕМ УСТРОЙСТВА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ОБОЧИН НА ОСНОВЕ НЕФТЕШЛАМОВЫХ СМЕСЕЙ

А. В. КОРОНЧИК, Е. М. ЖУКОВСКИЙ
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

В современных условиях развитие сети автомобильных дорог общего пользования низших категорий и местных проездов требует поиска экономически эффективных и ресурсосберегающих решений. Местные подъездные пути характеризуются высокой чувствительностью к водно-тепловому режиму и дефицитом прочности в краевых зонах (рисунок 1).



Рисунок 1 – Пример разрушения асфальтобетонного покрытия в краевой зоне

Согласно принципу неравномерного распределения транспортных нагрузок, даже при невысокой интенсивности движения, зоны наката и сопряжения с обочинами подвергаются ускоренному разрушению из-за инфильтрации поверхностных вод в основание. Для таких дорог критически важным является обеспечение максимальной защиты земляного полотна при минимальных затратах на материалы, что актуализирует использование вторичных ресурсов в рамках целей устойчивого развития и экологической безопасности.

Ключевой гипотезой является возможность качественного улучшения состояния дорог через устройство укрепленных обочин из модифицированного ремонтного материала [1]. В основу предлагаемого решения положен принцип максимизации параметра гидроизоляции, который характеризует суммарную ширину элементов дорожной конструкции, защищающих рабочую зону земляного полотна от переувлажнения. Устройство водонепроницаемых обочин на местных проездах позволит снизить влажность грунтов основания на 10–15 %, обеспечивая стабильность несущей способности

даже в неблагоприятные периоды года [2, 3]. В качестве основного материала для таких обочин предлагается использовать органоминеральные смеси на основе нефтяных шламов и асфальтогранулята.

Новизна подхода заключается в управлении межфазными контактами за счет введения в композицию тонкодисперсного компонента, например, шлама водоочистки [4]. При обычном смешивании нефтешлам обволакивает крупные куски асфальтогранулята снаружи, это может создавать слабые зоны, склонные к расслоению под нагрузкой и действием влаги. С целью решения этой задачи применяется принцип механоактивации для смеси асфальтогранулята, нефтешлама и тонкодисперсного шлама водоочистки. Микрочастицы шлама водоочистки под действием интенсивных сдвиговых усилий в смесителе принудительно смогут заполнять микропоры и дефекты поверхности асфальтогранулята. Позже, после добавления нефтешлама, эти частицы на своей развитой поверхности адсорбируют легкие маслянистые фракции, формируя плотную, структурированную мастику.

Именно эта мастика управляет межфазным взаимодействием. Она работает на границе раздела фаз и не просто обволакивает минеральные зерна, а заполняет все пустоты, создавая сплошной гидрофобный барьер. В результате формируется однородный композит с минимальной открытой пористостью. Как показывают исследования аналогичных систем, такое уплотнение мастичной фазы снижает водонасыщение материала и повышает его сдвигоустойчивость, так как нагрузка передается через сплошную структуру, а не через отдельные точечные контакты [5].

Применение такой смеси для устройства обочин местных проездов позволит создать вокруг дорожного полотна монолитный гидроизоляционный пояс. Благодаря изотропным свойствам нефтешламовой композиции, т. е. способности одинаково сопротивляться нагрузкам на сжатие и раскол, такая обочина способна выполнить роль поглотителя энергии. Кроме того, использование волокнистых стабилизирующих добавок (например, из отходов текстильного производства или целлюлозы) позволит удерживать оптимальное количество вяжущего в структуре смеси, обеспечивая её высокую плотность и долговечность [6].

Таким образом, предлагается переход от пассивных грунтовых обочин к активным стабилизированным зонам из нефтешламовых смесей, обеспечивающих комплексный эффект. С инженерной точки зрения, за счет увеличения параметра и упрочнения краевых зон значительно продлевается срок службы местных дорог без необходимости их перевода в более высокую категорию. С экономической и экологической точек зрения, использование крупнотоннажных отходов нефтепереработки и старого асфальта в сочетании с технологией активации позволяет снизить себестоимость строительства и эксплуатации. Данная модель формирования надежной дорожной инфраструктуры на основе использования вторичных ресурсов и возвращения их в производственный и эксплуатационный цикл является перспективным направлением развития дорожной отрасли Республики Беларусь, способствующим достижению нормативных показателей безопасности и качества транспортной сети.

Список литературы

1 Современный ремонтный материал для устранения ямочности на дорожных покрытиях / Е. М. Жуковский, А. В. Корончик, С. Е. Кравченко, Д. В. Глинский // Минск – Шанхай – Чанчунь: стратегия прорывного сотрудничества : сб. материалов науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апр. 2022 г. / М-во образования Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, Республиканское инновационное унитарное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник». – Минск : БНТУ, 2022. – С. 122–124. – EDN QHQGSF.

2 **Жуковский, Е. М.** Влияние укрепленных элементов обочин на изменение дефектности по ширине дорожных покрытий / Е. М. Жуковский, А. В. Ладышев, А. В. Корончик, С. Е. Кравченко // Автомобильные дороги и мосты. – 2022. – №1 (29). – С. 19–28.

3 **Жуковский, Е. М.** Разнопрочная дорожная одежда по ширине проезжей части автомобильной дороги как элемент достижения целей устойчивого развития / Е. М. Жуковский, А. В. Корончик, С. Е. Кравченко // Устойчивое развитие в условиях глобальных вызывов : сб. науч. ст. междунар. конф., Санкт-Петербург, 6–8 июня 2022 г. – СПб. : С.-Петерб. гос. экон. ун-т, 2022. – С. 96–103. – EDN ZJZSSC.

4 **Корончик, А. В.** Минеральные добавки как инструмент снижения углеродного следа в производстве дорожных бетонов / А. В. Корончик, Н. С. Гуриненко // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы V Междунар. науч.-техн. конф., 18–19 дек. 2025, г. Минск / сост.: Е. М. Жуковский, О. Б. Дрозд, Л. А. Кирилов, А. А. Кошелева. – Минск : БНТУ, 2026. – С. 318–320.

5 Mechanoactivated hybrid nanomodifiers for increasing the operational reliability of asphalt concrete / S. A. Zhdanok, P. P. Samtsov, P. P. Yatsevich, A. A. Afanasenka // Journal of Materials and Engineering Structures «JMES». – 2026. – Vol. 13, № 4. – P. 651–666.

6 **Afanasenka, A. A.** Analytical review of methods for stabilizing asphalt concrete mixtures with increased binder content / A. A. Afanasenka, P. P. Yatsevich, A. V. Koronchik // Bulletin of Civil Engineers. – 2024. – № 3 (104). – P. 59–70. – DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-3-59-70.

УДК 625.852:625.855.3

ЦВЕТНОЙ АСФАЛЬТ НА НЕФТЯНЫХ БИТУМАХ ДЛЯ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

С. Е. КРАВЧЕНКО, П. П. ЯЦЕВИЧ, А. А. АФАНАСЕНКО
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Применение цветных асфальтобетонных смесей в современной транспортной инфраструктуре служит эффективным инструментом функционального зонирования городских территорий, обеспечивая навигационную четкость и пространственное разделение транспортных и пешеходных потоков, что способствует повышению безопасности дорожного движения. Мировой опыт подтверждает целесообразность применения окрашенных покрытий при устройстве остановочных пунктов, тротуаров и велосипедных дорожек [1]. Дополнительным стимулом является снижение эффекта «городского теплового острова» благодаря высокому альбедо светлых покрытий.

Существующие подходы к производству цветных композитов включают использование осветленных битумных вяжущих, бесцветных вяжущих на основе синтезированных нефтеполимерных смол, прозрачных полимерных систем, а также прямое введение неорганических пигментов в традиционные нефтяные битумы. Прозрачные синтетические вяжущие обеспечивают исключительную цветопередачу, однако их многокомпонентность, термодинамическая нестабильность и высокая стоимость делают массовое внедрение экономически неэффективным. Альтернативный подход, реализованный в настоящем исследовании, основан на введении неорганических пигментов непосредственно в матрицу традиционных нефтяных битумных вяжущих. Данный метод технологически доступен и реализуется в рамках стандартного производственного цикла без масштабной модернизации оборудования.

Для реализации экспериментальной программы были запроектированы два варианта горячей плотной песчаной асфальтобетонной смеси типа Г на основе единого базового состава с применением вязкого нефтяного битума марки 70/100. Оба варианта содержали 5,1 % битума и имели единый минеральный каркас, в котором 5,4 % минерального порошка замещено высокодисперсным оксидом железа (Fe_2O_3). Главное различие заключалось в том, что в первый вариант поверхностно-активные вещества не вводились, тогда как во второй добавлялось ПАВ в количестве 0,1 % от массы смеси.

Современные исследования подтверждают, что физико-химические свойства пигментов непосредственно определяют реологическое поведение асфальтового вяжущего. Введение тонкодисперсных порошков повышает вязкость дисперсионной среды [2], улучшая сопротивление покрытия пластическим деформациям. Однако высокая удельная поверхность частиц неорганических пигментов приводит к интенсивной адсорбции легких мальтеновых фракций вяжущего, вызывая критическое утоньшение битумной пленки и деградацию адгезионных связей. Как показано в аналитическом обзоре методов стабилизации асфальтобетонных смесей, эффективное решение данной проблемы требует применения структурирующих добавок, обеспечивающих равномерное распределение дисперсной фазы [3]. Для компенсации этих эффектов в данной работе применено поверхностно-активное вещество, восстанавливающее прочность межфазных связей. Авторская методика оценки адгезионных связей на основе вакуумно-температурного воздействия позволила получить объективную количественную оценку эффективности применения добавок [4].

Результаты лабораторных испытаний свидетельствуют о значительных преимуществах варианта с ПАВ. Вариант без ПАВ демонстрирует критически высокие показатели водонасыщения (4,83 %) и набухания (0,62 %), превышающие нормативные требования. Введение ПАВ позволяет снизить водонасыщение до 1,22 % и набухание до 0,10 %. Коэффициент водостойкости повышается с 0,73 до 0,91, что свидетельствует о формировании термодинамически стабильной структуры, стойкой к расклинивающему действию влаги. Прочность при сжатии при 50 °С возрастает с 1,12 до 1,72 МПа, а прочность при растяжении при 0 °С увеличивается более чем вдвое, с 1,32 до 2,84 МПа. При этом, как показано в исследованиях усталостной долговечности модифицированных асфальтобетонов, повышение устойчивости к пластическим деформациям должно быть сбалансировано с сохранением достаточной трещиностойкости, поскольку чрезмерное увеличение жесткости может снижать долговечность материала при циклических нагрузках [5].

Положительные результаты лабораторных испытаний послужили обоснованием для практической апробации технологии при строительстве велосипедных дорожек в микрорайоне Новая Боровая г. Минска. Приемо-сдаточные испытания контрольных образцов, отобранных из бункера асфальтоукладчика, подтвердили высокую стабильность технологии в заводских условиях. Систематический мониторинг с 2017 по 2026 год подтверждает высокую стабильность оптических и структурно-механических характеристик. После девяти лет интенсивной эксплуатации общее техническое состояние покрытия оценивается как отличное. Применение методов структурно-феноменологической оценки сдвигоустойчивости позволяет более точно спрогнозировать эксплуатационную надежность таких покрытий [6].

Ключевым аспектом является высокая экономическая целесообразность предложенного подхода. Отказ от дорогостоящих прозрачных синтетических вяжущих в пользу традиционных нефтяных битумов, модифицированных ПАВ, обеспечивает существенное снижение себестоимости производства цветного асфальтобетона. Промышленная апробация на установке Benninghoven подтвердила, что производство цветной смеси не требует изменений в стандартной технологической схеме при наличии линии подачи сыпучих материалов. Жидкое ПАВ вводится непосредственно в поток горячего битума через существующую систему дозирования. Таким образом, цветные смеси могут производиться с использованием существующей инфраструктуры асфальтобетонных заводов без больших капитальных затрат.

Полученные результаты имеют важное значение для развития дорожного строительства в различных климатических регионах. Разработанная технология может быть масштабирована для производства цветных смесей различных оттенков путем подбора соответствующих неорганических пигментов. Перспективным направлением является изучение возможности применения композиционных биовяжущих для производства экологически безопасных цветных покрытий [7]. Кроме того, современные подходы к наномодификации открывают дополнительные возможности для повышения эксплуатационной надежности цветных асфальтобетонов за счет формирования более плотной структуры на микроуровне [8]. Комплексное применение разработанных решений позволяет создавать долговечные, эстетически привлекательные и функционально эффективные дорожные покрытия.

Список литературы

1 Innovative Pavement Solutions: A Comprehensive Review from Conventional Asphalt to Sustainable Colored Alternatives / A. Riaz, N. Yasir, G. Badin, Y. Mahmood // Infrastructures. – 2024. – Vol. 9, № 10. – Art. 186. – DOI: 10.3390/infrastructures9100186.

2 **Afanasenka, A. A.** Rheological Modeling and Mechanisms of Structure Formation in Disperse Systems Based on Organic Binders / A. A. Afanasenka // ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. – 2026. – Vol. 69, № 4. – P. 327–341. – DOI: 10.21122/1029-7448-2026-69-4-327-341.

3 **Afanasenka, A. A.** Analytical review of methods for stabilizing asphalt concrete mixtures with increased binder content / A. A. Afanasenka, P. P. Yatsevich, A. V. Koronchik // Bulletin of Civil Engineers. – 2024. – № 3 (104). – P. 59–70. – DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-3-59-70.

4 **Yatsevich, P. P.** Methodology for Assessing Adhesive Bonds of Binder with Stone Material Based on Vacuum-Temperature Effects / P. P. Yatsevich, A. A. Afanasenka // Science & Technique. – 2024. – Vol. 23, № 5. – P. 409–416. – DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-5-409-416.

5 **Веренько, В. А.** Исследование усталостной долговечности асфальтобетонов, модифицированных полимерными добавками различных типов / В. А. Веренько, А. В. Ладышев, Р. К. Гатальский // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 6. – С. 451–457. – DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-6-451-457.

6 **Афанасенко, А. А.** Структурно-феноменологическая оценка сдвигоустойчивости каркасных асфальтобетонов: уточнение расчетных параметров / А. А. Афанасенко, А. В. Ладышев, П. П. Яцевич // Дороги и мосты. – 2026. – № 55/1. – С. 185–207. – DOI: 10.70991/1815-896X-2026-1-55-185-207.

7 **Афанасенко, А. А.** Деформационная устойчивость щебеночно-мастичной органоминеральной смеси на композиционном биовяжущем / А. А. Афанасенко, П. П. Яцевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. – 2025. – № 3 (42). – С. 20–27. – DOI: 10.52928/2070-1683-2025-42-3-20-27.

8 Mechanoactivated hybrid nanomodifiers for increasing the operational reliability of asphalt concrete / S. A. Zhdanok, P. P. Samtsov, P. P. Yatsevich, A. A. Afanasenka // Journal of Materials and Engineering Structures «JMES». – 2026. – Vol. 13, № 4. – P. 651–666.

УДК 625.7/8:625.815.5

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЩЕБЁНОЧНО-МАСТИЧНОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА НА ОСНОВЕ МЕСТНОЙ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ, АРМИРОВАННОЙ БАЗАЛЬТОВЫМ ВОЛОКНОМ, К КОЛЕЕОБРАЗОВАНИЮ

С. З. КУРБОНОВ

Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

Щебёночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА) известен своей высокой устойчивостью к колееобразованию, тогда как обычный асфальтобетон широко применяется благодаря экономической эффективности. Повышение устойчивости асфальтобетонных покрытий к накоплению остаточных деформаций является одной из актуальных задач дорожного строительства, особенно в условиях интенсивного движения транспортных средств и воздействия повышенных температур [1].

В настоящем исследовании проводится сравнительный анализ устойчивости ЩМА и обычного асфальтобетона к образованию колеи. На основе экспериментальных данных изучается влияние модуля упругости и общей толщины дорожной одежды на глубину колеи, а также разрабатываются математические модели для прогнозирования данного показателя. Цель исследования заключается в оценке устойчивости ЩМА и обычного асфальтобетона к колееобразованию, выявлении основных факторов, влияющих на глубину колеи, и разработке практических рекомендаций по выбору и проектированию дорожных покрытий [2].

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

– оценка закономерностей формирования колеи в покрытиях из ЩМА и обычного асфальтобетона;

– разработка прогнозных моделей глубины колеи на основе модуля упругости и толщины дорожной одежды;

– сравнительная оценка эксплуатационных характеристик исследуемых материалов;

– разработка рекомендаций по проектированию дорожных покрытий с учётом условий эксплуатации.

Методология исследования

Исходные данные и статистическое обобщение. Для проведения исследования использованы данные о глубине колеи, модуле упругости и общей толщине дорожной одежды для двух типов асфальтобетонных покрытий (таблица 1). Для каждого материала сформировано по 50 наборов данных.

Таблица 1 – **Статистическое обобщение характеристик исследуемых материалов**

Среднее значение показателя	ЩМА	Асфальтобетон
Глубина колеи, мм	3,02	4,52
Модуль упругости, МПа	540,8	428,4
Общая толщина слоёв дорожной одежды, см	57,08	44,65

Для ЩМА использованы 50 наборов данных, включающих значения глубины колеи, модуля упругости в диапазоне 395–658 МПа и общей толщины дорожной одежды в диапазоне 53–60 см.

Для обычного асфальтобетона также использованы 50 наборов данных. Модуль упругости варьируется в пределах 287–574 МПа, а общая толщина дорожной одежды – от 32 до 50,5 см.

Результаты статистического обобщения показывают, что исследуемые конструкции с ЩМА характеризуются более высоким средним модулем упругости и большей общей толщиной дорожной одежды. Средняя глубина колеи для ЩМА составляет 3,02 мм, тогда как для обычного асфальтобетона этот показатель равен 4,52 мм. Таким образом, в исследуемой выборке ЩМА демонстрирует более высокую устойчивость к колееобразованию.

Корреляционный анализ. Для определения степени взаимосвязи между глубиной колеи, модулем упругости и общей толщиной дорожной одежды выполнен корреляционный анализ.

Получены следующие коэффициенты корреляции:

– ЩМА: между глубиной колеи и модулем упругости – $r = –0,97$; между глубиной колеи и общей толщиной дорожной одежды – $r = –0,29$;

– обычный асфальтобетон: между глубиной колеи и модулем упругости – r = –0,99; между глубиной колеи и общей толщиной дорожной одежды – r = –0,07.

Отрицательная корреляция между модулем упругости и глубиной колеи для обоих материалов свидетельствует о том, что с увеличением модуля упругости глубина колеи, как правило, уменьшается [1, 3]. Для обычного асфальтобетона эта связь выражена особенно сильно. Влияние общей толщины дорожной одежды на глубину колеи в исследуемой выборке существенно слабее, однако для ЩМА оно выражено заметнее, чем для обычного асфальтобетона.

Разработка прогнозных моделей. На основании исходных данных разработаны регрессионные модели для прогнозирования глубины колеи в зависимости от модуля упругости и общей толщины дорожной одежды.

Для ЩМА получена следующая зависимость:

$$y(RD) = 8{,}0089 – 0{,}0077x_1(E) – 0{,}0141x_2(h),\ R^2 = 0{,}926.$$

Для обычного асфальтобетона получена модель:

$$y(RD) = 10{,}3401 – 0{,}0136x_1(E) – 0{,}0004x_2(h),\ R^2 = 0{,}962.$$

Здесь $y(RD)$ – прогнозируемая глубина колеи, мм; x_1 – модуль упругости материала, МПа; $x_2(h)$ – общая толщина дорожной одежды; R^2 – коэффициент детерминации регрессионной модели.

Значение $R^2 = 0{,}926$ для ЩМА указывает на высокую степень соответствия модели исследуемым данным. Для обычного асфальтобетона коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0{,}962$, что также свидетельствует о высокой объясняющей способности модели в пределах рассматриваемой выборки.

Для ЩМА глубина колеи определяется совместным влиянием модуля упругости и толщины дорожной одежды. Для обычного асфальтобетона основным фактором в рамках построенной модели выступает модуль упругости, тогда как коэффициент при толщине имеет значительно меньшее значение.

По результатам проведённого исследования сформулированы следующие выводы:

1 Средняя глубина колеи для исследуемых конструкций с ЩМА составила 3,02 мм, тогда как для обычного асфальтобетона – 4,52 мм. Это свидетельствует о более высокой устойчивости ЩМА к колееобразованию в пределах рассмотренных данных.

2 Модуль упругости является одним из основных факторов, определяющих глубину колеи. Коэффициенты корреляции между этими показателями составили –0,97 для ЩМА и –0,99 для обычного асфальтобетона.

3 Влияние общей толщины дорожной одежды на глубину колеи для ЩМА выражено сильнее, чем для обычного асфальтобетона. Полученные коэффициенты корреляции составили соответственно –0,29 и –0,07.

4 Разработанные регрессионные модели характеризуются коэффициентами детерминации R_2 = = 0,926 для ЩМА и R_2 = 0,962 для обычного асфальтобетона и могут применяться для предварительной оценки глубины колеи в пределах исследованных диапазонов параметров.

Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании методов расчёта дорожных покрытий и выборе асфальтобетонных материалов, обеспечивающих повышенную устойчивость к колееобразованию.

Список литературы

1 **Гусев, Ю. М.** Остаточные деформации грунтов в строительстве / Ю. М. Гусев. – Киев : Вищ. шк., 1980. – 84 с.

3 **Иванов, Н. Н.** Расчёт и испытание нежёстких дорожных одежд / Н. Н. Иванов. – М. : Высш. шк., 1971. – 100 с.

4 Закон Гука // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Закон_Гука (дата обращения: 01.10.2026).

УДК 625.8

ХОЛОДНЫЙ РЕСАЙКЛИНГ КАК РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

А. А. КУЧИНСКАЯ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Уровень автомобилизации в населенных пунктах и постоянно возрастающая интенсивность движения на автомобильных дорогах требуют новых подходов к ремонту (восстановлению) дорожного покрытия. Одним из таких подходов в Республике Беларусь является динамично развивающаяся технология холодного ресайклинга, так как ее преимущества – минимальное нанесение вреда окружающей среде и экономичность. Ведь традиционные методы восстановления дорог требуют больших затрат из-за высокой стоимости новых материалов и необходимости утилизации асфальтобетона.

Прочное уплотненное основание образуется в процессе переработки измельченного асфальтогранулята, который смешивается с цементом и битумной эмульсией. Такое основание служит надежным, жестким фундаментом, который эффективно распределяет транспортные нагрузки и защищает дорогу от трещин и просадок.

Технология холодного ресайклинга позволяет производить ремонт существующих дорог с использованием старого асфальтобетонного покрытия путем смешения материалов на дороге или на заводе. Для получения материала, удовлетворяющего требованиям норм и нагрузки от движения, необходимо проверить лабораторными методами образцы, изготовленные из материалов старой дорожной одежды и вяжущего.

В качестве вяжущего возможно применять цемент в сухом виде или водной суспензии, битум или битумную эмульсию, или комплекс этих вяжущих.

В состав работ по устройству оснований способом холодного ресайклинга с применением комплексного вяжущего, приготовленного способом смешения, на автомобильной дороге входят:

– подготовительные работы;

– распределение цемента (осуществляется цементовозом-распределителем в зависимости от нормы расхода цемента на 1 $м^2$);

– фрезерование асфальтобетонного покрытия с одновременным перемешиванием материала и цемента (выполняется дорожной фрезой с оставлением асфальтогранулята в основании отфрезерованного слоя);

– профилирование поверхности основания (разравнивание и профилирование отфрезерованного материала производится автогрейдером от края проезжей части к оси дороги за 2–3 подхода по одному следу);

– распределение битумной эмульсии (выполняется автогудронатором за 2–3 прохода);

– перемешивание укрепляемых материалов, цемента и битумной эмульсии дорожной фрезой (устройство укрепленного основания при применении дорожной фрезы выполняется примыкающими полосами, ширина которых должна определяться шириной перемешивающего рабочего органа);

– подвоз воды и увлажнение смеси укрепляемых материалов до требуемой оптимальной влажности (в процессе второго перемешивания укрепляемой смеси определяется влажность смеси и при необходимости производится увлажнение смеси машиной дорожной комбинированной);

– разравнивание и профилирование поверхности укрепляемых материалов с одновременным окончательным перемешиванием (окончательное перемешивание укрепляемых материалов и воды);

– уплотнение спрофилированного слоя (уплотнение выполняется вначале гладковальцевыми катками, а затем самоходными катками на пневматических шинах);

– чистовая отделка уплотненного слоя (включает в себя чистовую отделку поверхности уплотненного слоя при помощи автогрейдера и при необходимости вручную дорожными рабочими);

– доуплотнение слоя основания (доуплотнение поверхности основания после чистовой отделки выполняется гладковальцевым катком);

– заключительные работы.

Расход материалов для проведения ремонта покрытия по методу холодного ресайклинга на площади 1000 м^2 при толщине 0,10 м указан в таблице 1.

Таблица 1 – **Ориентировочный расход материалов**

Материал	Наименование и обозначение ТНПА	Единица измерения	Количество
Ресайклируемая смесь	ТКП 620-2018	м^3	120
Портландцемент	ГОСТ 31108	т	11,53
Битумная эмульсия	СТБ 1245	т	13,89
Вода	СТБ 1114	т	10,5*
*Норма воды зависит от погодных условий в период строительства и уточняется в процессе выполнения работ.			

По физико-механическим показателям ресайклированный материал должен соответствовать требованиям, указанным в таблице 2.

Таблица 2 – **Физико-механические показатели**

Показатель	Значение показателя
Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С, МПа, после 14 сут, не менее	1,4
Предел прочности при растяжении при изгибе, МПа	1,5–2,0
Коэффициент водостойкости, не менее	0,6
Водонасыщение, % по объему, не более	14,0
Набухание, % по объему, не более	2,0
Остаточная пористость, %	10,0–20,0

Предлагаемый вид ремонта финансово экономичнее традиционного метода устройства основания, поскольку затраты ниже на треть и более за счет сокращения затрат на вывоз старого асфальтобетонного лома и покупки нового щебня в меньших объемах. При традиционном устройстве оснований старое асфальтобетонное покрытие полностью фрезеруют, увозят на специализированные заводы по переработке для дробления во вторичный щебень, на асфальтобетонные заводы для повторного использования или на полигоны для захоронения строительных отходов; затем осуществляется доставка и укладка новых материалов для устройства оснований и покрытий дорог.

Помимо этого, данный подход отличается большей экологичностью, чем традиционный метод, поскольку исключает необходимость перевозки материалов и снижает выбросы углекислого газа (диоксида углерода) на 60 %.

Таким образом, холодный ресайклинг – это эффективный, экологичный и экономичный метод восстановления дорожного покрытия. Он заменяет долгий традиционный ремонт и позволяет быстро восстанавливать дорожное покрытие без полной замены основания с помощью дорожной фрезы и добавления вяжущих материалов.

Список литературы

1 Автомобильные дороги. Восстановление и усиление нежестких дорожных одежд с применением геосинтетических материалов и повторным использованием материалов конструктивных слоев : ТКП 620-2018 (33200). – Введ. 01.06.2018. – Минск : Минтранс, 2018. – IV, 53 с.

2 Цементы общестроительные. Технические условия : ГОСТ 31108-2020 : межгос. стандарт : взамен ГОСТ 31108-2016, ГОСТ 10178-85 : дата введения 2022-01-01. – Минск : Госстандарт, 2021. – IV, 20 с.

3 Эмульсии битумные дорожные катионные. Технические условия : СТБ 1245-2024 : взамен СТБ 1245-2015 : дата введения 2025-01-01. – Минск : Госстандарт, 2024. – 19 с.

4 Вода для бетонов и растворов. Технические условия : СТБ 1114-98 : взамен ГОСТ 23732-79 : дата введения 1999-01-01. – Минск : Минстройархитектуры, 1998. – II, 12 с.

5 Холодный ресайклинг : руководство по применению / Wirtgen GmbH. – 5-е изд. – Windhagen : Wirtgen GmbH, 2019. – 368 с. (Главное мировое практическое пособие по работе на ресайклерах, признанное в РБ).

УДК 625.8

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ И СДВИГОУСТОЙЧИВОСТЬ АСФАЛЬТОБЕТОНА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. В. ЛАДЫШЕВ
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Сдвиговые деформации асфальтобетона, проявляющиеся в виде колеи и наплывов, являются одной из основных причин снижения эксплуатационной надежности нежестких дорожных одежд. Особенно существенное влияние на их развитие оказывают высокие температуры и многократное воздействие транспортной нагрузки. Асфальтобетон при этом проявляет сложное реологическое поведение, сочетающее упругие, вязкие и пластические свойства, что ограничивает применение расчетных моделей, основанных только на постоянных значениях модуля упругости.

В мировой практике оценка сдвигоустойчивости асфальтобетона осуществляется различными методами. К первой группе относятся методы оценки предельного равновесия, основанные на критериях прочности. Наиболее распространен критерий Мора – Кулона, согласно которому предельное состояние материала определяется соотношением между действующими касательными и нормальными напряжениями с учетом сцепления материала и сопротивления внутреннему трению. Данный подход позволяет перейти от экспериментально определяемых характеристик материала к оценке предельного состояния и коэффициента запаса сдвигоустойчивости дорожной конструкции.

Критерий Мора – Кулона имеет существенное значение и для методологической практики Республики Беларусь. В монографии «Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц» (авторы: В. А. Веренько и др.) рассмотрены критерии устойчивости асфальтобетонных покрытий и современные подходы к их расчету [1]. Развитие данного направления применительно к каркасным асфальтобетонам представлено в работе А. А. Афанасенко, А. В. Ладышева и П. П. Яцевича, в которой уточняются расчетные параметры критерия Мора – Кулона с учетом особенностей структурно-феноменологического поведения каркасных смесей [2].

Вторая группа методов направлена непосредственно на исследование накопления необратимых деформаций при повторном нагружении. К ней относятся испытания на циклическое сжатие и сдвиг, испытания на повторное (циклическое) нагружение (repeated load tests), а также методы определения числа текучести (Flow Number). Основным объектом оценки является зависимость остаточной деформации от числа циклов нагружения. Такие испытания позволяют выявить переход от режима стабилизации деформаций к прогрессирующему пластическому течению и поэтому дают более непосредственную информацию о деформационной устойчивости материала при многократном воздействии нагрузки.

Третью группу составляют эксплуатационно-ориентированные методы, в частности испытания на колееобразование на установке Гамбурга (Hamburg Wheel Tracking Test) и испытания на установке APA (Asphalt Pavement Analyzer), в которых непосредственно моделируется воздействие движущегося колеса и определяется развитие колеи во времени или в зависимости от числа проходов нагрузки. Преимуществом этих методов является близость условий испытания к реальному механизму образования колеи, однако получаемые показатели являются преимущественно интегральными характеристиками смеси и требуют дополнительной интерпретации при переходе к расчетным моделям дорожных конструкций.

Таким образом, методы оценки сдвигоустойчивости можно условно разделить на прочностной, деформационный и эксплуатационный подходы. Первый позволяет определить предельное состояние материала и непосредственно использовать результаты при расчете конструкции; второй характеризует кинетику накопления остаточных деформаций; третий позволяет оценить интегральную устойчивость смеси к колееобразованию.

В проведенной ранее работе [3] исследовано влияние физической нелинейности и различия свойств асфальтобетона при растяжении и сжатии на сдвигоустойчивость дорожных одежд. Расчеты выполнены методом конечных элементов с использованием коэффициента запаса прочности, определяемого на основе критерия Мора – Кулона. Установлено, что учет реальных деформационных характеристик приводит к изменению коэффициента запаса прочности на 10–20 % в зависимости от сочетания свойств материалов конструктивных слоев.

В последующих исследованиях выполнено экспериментальное определение параметров нелинейности и структурно-механической анизотропии (различия модулей деформации при растяжении и сжатии) модифицированных асфальтобетонов при температуре 50 °С. Испытания проводились на одноосное сжатие цилиндрических образцов диаметром 71,4 мм и одноосное растяжение образцов в форме «восьмерки». Для трех составов асфальтобетона установлено, что применение модифицированного битума увеличивает максимальный модуль деформации до 41 %, уменьшает анизотропию до 20 %, а нелинейность – до 75 %. При расчете дорожных конструкций учет этих характеристик изменял коэффициент запаса прочности по критерию сдвигоустойчивости на 5–15 %; в отдельных случаях погрешность оценки эффективности модификации составила около 6 %.

Следующим этапом стало исследование деформационной устойчивости каркасного асфальтобетона при циклическом одноосном сжатии при температуре 50 °С. Испытания цилиндрических образцов диаметром и высотой 71,4 мм проводились при скорости деформирования 3,0 мм/мин. Установлено наличие двух характерных режимов поведения материала. При уровнях нагрузки до 25 % от предельной остаточные деформации постепенно стабилизировались, а модуль деформации возрастал. При уровнях нагрузки 50 % и более наблюдалось прогрессирующее накопление остаточной деформации и снижение модуля (падение на 28 % за десять циклов при нагрузке 75 %). Выявленное разделение поведения материала на стадии стабилизации и пластического течения согласуется с фундаментальными положениями теории циклической приспособляемости дорожных покрытий [4].

Полученные результаты показывают, что оценка сдвигоустойчивости асфальтобетона только по условию предельного равновесия недостаточна для полного описания его работы при высоких температурах. Перспективным направлением является совместное рассмотрение предельной прочности, нелинейности и анизотропии деформационных свойств, а также кинетики накопления остаточных деформаций. Такой подход создает основу для последующего построения реологической модели материала и ее применения при расчетах напряженно-деформированного состояния и деформационной устойчивости дорожных конструкций.

Список литературы

1 Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц / В. А. Веренько, В. В. Занкович, А. А. Ладышев [и др.] ; под ред. В. А. Веренько. – Минск : Арт Дизайн, 2015. – 291 с.

2 **Афанасенко, А. А.** Структурно-феноменологическая оценка сдвигоустойчивости каркасных асфальтобетонов: уточнение расчетных параметров / А. А. Афанасенко, А. В. Ладышев, П. П. Яцевич // Дороги и мосты. – 2026. – № 1 (55). – С. 185–207.

3 **Ладышев, А. В.** Анализ влияния деформационных характеристик асфальтобетонных слоев на сдвигоустойчивость дорожных одежд с помощью счетного эксперимента / А. В. Ладышев // Автомобильные дороги и мосты. – 2017. – № 1. – С. 74–79.

4 **Raad, L.** Analysis of Full-Depth Asphalt Concrete Pavements Using Shakedown Theory / L. Raad, D. Weichert, A. Haidar // Transportation Research Record. – 1989. – № 1227. – P. 53–65.

УДК 625.143:625.1:006.354

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАРУБЕЖНЫХ СТАНДАРТОВ СЕРИИ EN 13232 ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПУТИ КОЛЕИ 1520 мм

А. С. ЛАПУШКИН

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Стрелочные переводы являются наиболее ответственными и одновременно наиболее уязвимыми элементами железнодорожного пути. На рельсовой колее 1520 мм на их долю приходится значительная часть отказов, связанных с геометрией пути и износом элементов. Ужесточение требований к безопасности, рост скоростей движения и осевых нагрузок требуют пересмотра подходов к проектированию и содержанию стрелочных переводов. Исторически сложившаяся система норм и допусков ориентирована на типовые конструкции и назначенные сроки службы, что обеспечивало высокую степень унификации и ремонтопригодности, но ограничивало возможности оптимизации под нетиповые условия эксплуатации.

Европейская методология, закреплённая в серии стандартов EN 13232, предлагает иной подход, основанный на управлении рисками и расчетном обосновании безопасности. Актуальным на сегодняшний день является определение возможности использования математического аппарата и концепций указанного стандарта для модернизации отечественной нормативной базы без утраты накопленного эксплуатационного опыта. Следует рассматривать как области прямой применимости европейских методик, так и факторы, требующие существенной адаптации.

Стандарт EN 13232 состоит из девяти частей, охватывающих требования к проектированию, геометрии, материалам, изготовлению, приёмке и содержанию. Ключевым принципом является рассмотрение стрелочного перевода как единой динамической системы. Такой системный взгляд позволяет учитывать взаимное влияние рельсовой колеи, остряков, крестовин и подрельсового основания на безопасность и долговечность.

Методологическим ядром стандарта является процедура подтверждения соответствия, предусматривающая переход от натурных испытаний «до разрушения» к математическому моделированию с последующей верификацией на ограниченном объёме тестов. Вводится понятие расчётного сценария нагружения, который описывает наиболее неблагоприятные сочетания нагрузок и воздействий, а также понятие предельных состояний по несущей способности, по усталости, по эксплуатационной пригодности. Такой подход позволяет прогнозировать поведение конструкции на ранних стадиях проектирования и обоснованно назначать сроки ремонта и проведения работ по текущему содержанию.

Однако следует подчеркнуть, что EN 13232 не является сводом жёстких правил и чертежей. Это, прежде всего, инструмент доказательства безопасности, допускающий вариативность конструктивных решений при условии их расчётного обоснования. Именно эта особенность делает методологию потенциально совместимой с отечественной практикой, ориентированной на типовые проекты.

Прямое копирование европейских норм невозможно без учёта ряда физических и нормативных факторов. В первую очередь, речь идёт о геометрических различиях: ширине колеи (1520 мм и 1435 мм) и допусках на содержание пути. Разница в 85 мм на первый взгляд незначительна, однако она существенно влияет на динамику взаимодействия подвижного состава и пути, особенно в зоне стрелочного перевода, где траектория движения колёс претерпевает изменения.

Существенное влияние оказывает конструкция ходовых частей. Тележки, широко распространённые на пространстве 1520, обладают иной жёсткостью и характером взаимодействия по сравнению с европейскими аналогами, например, тележкой Y25. Для тележки 18-100 характерны большие зазоры между гребнями колёс и рельсами, что приводит к извилистому движению и повышенным боковым силам. Европейские формулы расчёта динамики, ориентированные на меньшие зазоры и иную геометрию тележек, не в полной мере учитывают эти особенности, что требует корректировки расчётных сценариев.

Климатический фактор вносит дополнительные коррективы. Работа рельсовой стали при экстремально низких температурах сопряжена с риском хрупкого разрушения, который в EN 13232 учтён недостаточно полно. Отечественный опыт эксплуатации в условиях Сибири и Дальнего Востока показывает, что ударные нагрузки и хрупкие трещины в зоне остряков и крестовин могут возникать при температурах, которые для европейской сети являются экстремальными, а для пространства 1520 – регулярными. Это требует введения дополнительных требований к ударной вязкости материалов и учёта температурных деформаций в расчётных моделях.

Также требуется адаптация моделей упругости подрельсового основания. EN 13232 ориентирован на железобетонные брусья со стандартными скреплениями. На ряде участков сети 1520 сохраняется применение деревянных брусьев и смешанных эпюр, что изменяет характеристики упругого основания и требует корректировки граничных условий в конечно-элементных моделях. Игнорирование этого фактора может привести к занижению расчётных напряжений и, как следствие, к недооценке усталостной долговечности.

Ряд методик EN 13232 применим на колее 1520 без существенных изменений. В частности, алгоритмы расчёта переводных кривых и желобов, а также оптимизация геометрии для снижения динамических ударов. Прочностные расчёты рамных рельсов и остряков с использованием метода конечных элементов и принципов оценки усталостной прочности также могут быть адаптированы. Критерии безопасности от схода универсальны с точки зрения физики, однако требуют калибровки под отечественные профили колёс и рельсов.

Тем не менее отдельные разделы требуют переработки. Европейские формулы расчёта динамики не учитывают особенности извилистого движения тележек с большим зазором гребней. Стандарты усталостной долговечности ориентированы на европейский грузопоток, характеризующийся преобладанием пассажирских и лёгких грузовых поездов. Для условий тяжеловесного движения и высокой грузонапряженности колеи 1520 требуется пересчёт циклов нагружения и введение дополнительных коэффициентов запаса, учитывающих повышенные осевые нагрузки и интенсивность обращения.

Вызывает интерес и европейская практика допуска эксплуатации с большими вертикальными износами при условии контроля геометрии. На колее 1520 такая практика несовместима с текущей культурой содержания пути и типами стрелочных гарнитур. Механический перенос норм износа может привести к снижению безопасности, поскольку отечественная система контроля состояния пути ориентирована на иные критерии предельных износов. Кроме того, полный переход на «расчётные» индивидуальные проекты может повлиять на заводы-изготовители и дистанции пути из-за отсутствия опыта и необходимых компетенций.

Для успешной интеграции методологии EN 13232 необходимо выполнить ряд мероприятий. Первым шагом должна стать верификация моделей: создание эталонных конечно-элементных моделей существующих типовых переводов (например, Р65 марки 1/11 проекта 2750) и проверка их сходимости с данными натурных тензометрических испытаний, проведённых ранее ВНИИЖТ и РУТ (МИИТ). Без такой верификации использование расчётных методов не может считаться обоснованным.

На основе верифицированных моделей целесообразна разработка «гибридного» национального стандарта, гармонизированного с EN 13232 в части терминологии и методов расчётов, но сохраняющего отечественные требования к допускам содержания и материалам. Такой стандарт должен сочетать расчётное обоснование безопасности с проверенными временем типовыми решениями, что позволит избежать как консервации устаревших норм, так и необоснованного риска при внедрении новых конструкций.

Также требуется локализация и адаптация европейского программного обеспечения или разработка отечественного софта для автоматического расчёта стрелочных переводов по методике EN для колеи 1520. Программное обеспечение должно верифицироваться независимыми тестами и быть доступным проектным организациям и дистанциям пути.

Методология EN 13232 представляет собой инструмент доказательства безопасности, а не свод жёстких правил и чертежей. Концептуально она полностью применима на пространстве 1520. Главным риском является механический перенос норм без учёта специфики тяжеловесного движения и климата, что может привести к снижению безопасности и росту аварийности. Использование EN 13232 видится не как замена существующей системы, а как аналитическое ядро для создания нового поколения отечественных стандартов, основанных на расчётных методах обоснования безопасности. Такой подход позволит сохранить преимущества типового проектирования и накопленный опыт содержания пути, дополнив их современными методами оценки рисков и прогнозирования ресурса.

УДК 378.16

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБУСТРОЙСТВА ОБЪЕКТОВ СЕРВИСА ПРИ РАЗВИТИИ ДОРОЖНОЙ СЕТИ: МОНОЛИТНЫЕ РЕЗИНОВЫЕ ПОКРЫТИЯ

П. А. ЛИСТРАТЕНКО, А. А. ЦАРЕНКОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Развитие дорожной сети Республики Беларусь неразрывно связано с созданием и модернизацией объектов придорожного сервиса. В современных условиях, характеризующихся достаточно высоким уровнем интенсивности движения как во внутриреспубликанском, так и международном сообщении, вопросы совершенствования обустройства объектов сервиса приобретают особую актуальность. При этом развитие придорожного сервиса выступает не только фактором повышения ка-

чества транспортного обслуживания, но и действенным инструментом социально-экономического развития [1]. При принятии инфраструктурных решений следует учитывать комфорт и безопасность пользователей во время остановок в пути. Дополнительные возможности для повышения качества придорожного сервиса предоставляют современные покрытия для зон отдыха. Перспективным направлением является устройство монолитных резиновых покрытий на объектах благоустройства транспортной инфраструктуры, которые в последние годы всё активнее применяются при обустройстве детских и спортивных площадок на внутридворовой территории населенных пунктов.

Технология производства монолитных резиновых покрытий основана на переработке изношенных автомобильных шин, что делает ее экономически и экологически целесообразной в контексте экономики замкнутого цикла. В процессе переработки от шин отделяются металлический и текстильный корд, а оставшаяся резиновая основа подвергается механическому дроблению и измельчению до однородных гранул. Полученная резиновая крошка смешивается с полиуретановым связующим и пигментом. Гранулят распределяется по подготовленному основанию ровным слоем и далее укатывается вручную – специальным валиком или гладилкой – для равномерного распределения и удаления воздушных пузырей. Применение специализированной техники для уплотнения не дает необходимого эффекта ввиду высокой подвижности и мягкости массы. После укатки происходит ее затвердевание при обычной температуре за счёт реакции связующего с влагой воздуха, дополнительный нагрев не требуется. Это позволяет обеспечить монолитную поверхность без стыков и швов.

Существуют различные модификации данной системы. Применяется двухслойная система: нижний (амортизационный) слой выполняется из более дешёвой чёрной резиновой крошки (SBR), полученной из переработанных шин; верхний – из цветных гранул EPDM. Декоративный слой EPDM отвечает за стойкость цвета к ультрафиолету и привлекательный внешний вид, нижний слой SBR обеспечивает основную ударопоглощающую функцию. В состав полиуретанового связующего или в гранулы требуется введение функциональных добавок: антимикробных агентов для предотвращения роста бактерий и плесени во влажном климате, а также веществ, поглощающих запахи.

Монолитное резиновое покрытие не является несущим слоем и поэтому должно укладываться на жёсткое, ровное и прочное основание. Устройство покрытия на уплотнённый грунт, щебень или песок не допускается, т. к. отсутствие жёсткого основания приведет к образованию дефектов в виде трещин и отслоений. При проектировании зон отдыха на объектах придорожного сервиса для устройства основания можно использовать асфальто- или цементобетонные смеси. Это удорожает конструкцию, но обеспечивает значительно больший срок службы и безопасность. Технологическим ограничением является температурный режим: работы рекомендуется проводить при температуре воздуха выше +2 °С и при отсутствии осадков, поэтому в климатических условиях Республики Беларусь оптимальным для устройства монолитных покрытий является период с мая по октябрь.

При устройстве монолитных резиновых покрытий в зонах отдыха объектов придорожного сервиса следует руководствоваться требованиями Технического регламента ЕАЭС ТР ЕАЭС 042/2017 «О безопасности оборудования для детских игровых площадок» [2]. Этот документ распространяется на ударопоглощающие покрытия, в том числе резиновые, и устанавливает обязательные требования к гигиенической безопасности материалов. Согласно Приложению № 2 к ТР ЕАЭС 042/2017, материалы, применяемые при производстве покрытий, не должны стимулировать рост и развитие микрофлоры, в том числе патогенной; интенсивность запаха не должна превышать 2 баллов; уровень напряжённости электростатического поля не должен превышать 15,0 кВ/м; материалы не должны выделять в окружающую среду летучие вещества в опасных концентрациях. Ударопоглощающее резиновое покрытие подлежит обязательной сертификации. Сертификация покрытий по указанным документам является условием для их допуска к эксплуатации на объектах придорожного сервиса.

Экономическая целесообразность данного решения, как было отмечено ранее, подтверждается развитой сырьевой базой. В Беларуси функционирует около 11 предприятий по переработке шин [3]. За девять месяцев 2025 года собрано и направлено на переработку 47,69 тыс. т изношенных шин. В 2024 году в республике собрано 60,2 тыс. т изношенных шин [3]. В рамках инициативы «Один район – один проект» создаются новые производственные мощности, полностью оснащённые отечественным оборудованием по переработке изношенных автомобильных шин и производству полимерно-резиновых изделий.

Устройство монолитных резиновых покрытий имеет ряд преимуществ при их применении на объектах придорожного сервиса для площадок, эксплуатируемых круглогодично под открытым небом. Они обладают противоскользящими свойствами, устойчивы к температурным перепадам и влажности, выдерживают длительное воздействие солнечных лучей. Кроме того, покрытие обеспечивает безопасность детей при падении за счёт ударопоглощающих свойств, отсутствие стыков снижает вероятность развития дефектов этих зонах. Бесшовные монолитные решения превосходят плиточные по прочности и долговечности, а в интеграции с системами водоотведения и подогрева для круглогодичной эксплуатации, расширении цветовой гаммы и декоративных решений представляют принципиально новые решения для архитектурного обустройства инфраструктурных объектов. Дальнейшее снижение себестоимости возможно за счёт роста объёмов сбора и переработки шин – потенциал здесь значителен.

Таким образом, монолитные резиновые покрытия представляют собой технологию, которая органично дополняет концепцию современного придорожного сервиса. Они позволяют повысить уровень безопасности и комфорта пользователей, продлить срок службы благоустроенных территорий и создать экономически эффективное производство на основе переработки отходов.

Список литературы

1 **Евстратенко, А. В.** Территориальная организация объектов придорожного обслуживания в Беларуси / А. В. Евстратенко // Архитектура : сб. науч. тр. – Минск : БНТУ, 2019. – Вып. 12. – С. 119–126.

2 ТР ЕАЭС 042/2017. Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности оборудования для детских игровых площадок» // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/456065182 (дата обращения: 14.09.2026).

3 Реестр объектов по использованию отходов // Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – URL: https://minpriroda.gov.by/ru/objecty-ru/ (дата обращения: 14.09.2026).

УДК 625.7/.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ

В. Л. ЛОБАНОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Поддержание целостности автомобильных трасс является приоритетным для белорусской дорожной сферы. Несмотря на улучшение нормативно-технической базы (включая ТКП и СТБ) и применение передовых методов, реальная долговечность асфальтобетонного покрытия зачастую не соответствует проектным расчетам. На территории страны увеличивается количество таких повреждений, как продольные и поперечные трещины, выбоины, колеи, шелушение поверхности и остаточные деформации.

Изучение научной литературы [1–4] свидетельствует, что причины разрушения дорожных конструкций обычно не являются изолированными. Сбой чаще всего обусловлен совокупным воздействием нескольких деструктивных элементов. В настоящем исследовании предпринята попытка систематизировать и подробно разобрать три главных блока проблем: ошибки на этапе проектирования, недостатки при выполнении работ и нагрузки в процессе эксплуатации (с учетом климатических условий).

Главная задача работы заключается в глубоком анализе механизмов влияния выделенных факторов на формирование специфических дефектов, а также в разработке первоочередных профилактических мер, соответствующих актуальным требованиям законодательства Республики Беларусь.

Фундаментом будущего дорожного полотна выступает проект. Ошибки, допущенные на этапе разработки, крайне трудно нивелировать даже при высоком качестве монтажных работ. Разработка проектов нежестких покрытий должна опираться на точные данные инженерно-геологических исследований и прогнозируемую интенсивность транспортного потока.

Ключевые проектные ошибки:

1 Некорректная оценка гидрогеологической обстановки. Для Беларуси, которой характерны высокая влажность и частые переходы температурного режима через нулевую отметку, это

провоцирует снижение несущей способности основания и появление просадочных трещин в осенне-весенний период.

2 Неточности и ошибки в расчете армирующих слоев. Неточности в определении модуля упругости дорожной конструкции приводят к уменьшению толщины асфальтобетонных слоев или подбору неподходящей марки битума и типа смеси для реальных условий эксплуатации, что критично сказывается на долговечности дорог с высокой долей большегрузного транспорта.

3 Пренебрежение перспективной нагрузкой. Если проект базируется на устаревших данных о транспортном потоке, происходит ускоренное накопление усталостных деформаций. Возникает «усталостное разрушение» – сетка трещин, которая формируется даже при относительно небольшой массе отдельных автомобилей, но при их высокой частоте.

4 Несоответствие марки асфальтобетона климатическим условиям. Применение битума, не подходящего по температурному диапазону (например, с недостаточной морозостойкостью или теплостойкостью), вызывает системную деградацию покрытия. В Беларуси, согласно СТБ 1033 [3], при выборе марки битума необходимо учитывать среднюю температуру наиболее холодной пятидневки и максимальную летнюю температуру.

Помимо проектных ошибок на долговечность дорог оказывают влияние и производственные факторы (нарушение технологического процесса).

Дефекты данного типа выступают главной причиной преждевременного ремонта дорог в первые 1–3 года их эксплуатации. Их подразделяют на проблемы приготовления смеси на асфальтобетонном заводе (АБЗ) и ошибки, допущенные при укладке покрытия на трассе.

Влияние технологических нарушений на образование дефектов приведено в таблице 1.

Таблица 1 – **Влияние технологических нарушений на образование дефектов**

Нарушение технологии	Механизм воздействия	Характерный дефект
Недостаточная температура уплотнения	Высокая остаточная пористость, доступ воды	Выкрашивание, выбоины
Перегрев смеси при выпуске	Старение (окисление) битума	Трещины, шелушение
Несоблюдение дозировки битума	Снижение адгезии (мало) / сдвиг (много)	Расслоение, колея
Плохое сцепление слоев	Отсутствие подгрунтовки	Сдвиговые трещины
Сегрегация смеси при отгрузке	Неоднородность состава	Ямочность, разрушение кромок

Ключевым параметром выступает температурный режим. Выполнение работ по укладке смеси при показателях, ниже установленных нормативами, приводит к формальному уплотнению асфальтобетона без достижения требуемой плотности. Проникновение влаги в поры и ее последующее замерзание, сопровождающееся расширением объема на 9 %, разрушает структурный каркас материала, что провоцирует стремительное крошение покрытия.

Немаловажное значение имеет соблюдение технологии сопряжения рабочих швов. Продольные или поперечные стыки, не прошедшие качественной подготовки (прогрева и обрезки кромок), формируют участки с пониженной плотностью и слабой гидроизоляцией. Именно в зоне швов чаще всего инициируются процессы деградации дорожного полотна.

Важную роль играет степень сцепления битумного связующего с каменным заполнителем. Применение щебня низкого качества (загрязненного глинистыми включениями или содержащего повышенное количество лещадных зерен) даже при безупречном соблюдении технологического процесса вызывает расслоение смеси под воздействием транспортных нагрузок. Все требования к качеству материалов строго регламентированы стандартом СТБ 1033 [3] и подлежат неукоснительному выполнению.

Условия эксплуатации (климатические и транспортные нагрузки) также разрушают дорогу.

Даже надежное дорожное полотно разрушается под влиянием времени, погодных условий и транспортных потоков, если режим эксплуатации не согласован с инженерными проектами.

Главной причиной деградации является динамическое давление колес тяжелогрузного транспорта. Превышение нормативной нагрузки на ось (например, 11–13 тонн вместо разрешенных 10 тонн) приводит к экспоненциальному сокращению срока службы покрытия. Это провоцирует образование пластичных колеи – необратимых деформаций слоев основания в местах движения колес. В жаркую погоду битум размягчается, и сдвиговые усилия от машин буквально вытесняют материал из-под колес. В Беларуси ситуация осложняется движением тяжеловесных автопоездов в знойные дни, когда температура дорожного полотна может достигать 55–60 °С.

Климат Беларуси отличается умеренной континентальностью, частыми зимними оттепелями и высоким уровнем осадков. При похолодании материалы сжимаются. Если покрытие не способно свободно менять форму из-за сцепления с основанием и трения, возникают растягивающие напряжения, вызывающие поперечные температурные трещины с периодичностью 10–50 метров.

Циклы замораживания и оттаивания (характерные для белорусских зим при переходе через 0 °С) резко снижают прочность материалов основания. Капиллярный подъем влаги к нижней части асфальтобетона и ее расширение при замерзании приводят к отслоению асфальта от основания и образованию просадок. Постоянное воздействие солнечной радиации вызывает старение вяжущего вещества в верхнем слое (потерю эластичности). Это снижает устойчивость к растрескиванию и вызывает шелушение поверхности (выкрашивание щебня).

Таким образом процесс деформирования и разрушения асфальтобетонного покрытия – многофакторный процесс, в котором причина часто является комбинацией проектных, производственных и эксплуатационных ошибок. А для повышения срока службы покрытий необходимо совершенствовать методы лабораторного подбора составов, имитирующих реальные нагрузки, и ужесточать контроль за приемкой скрытых работ на этапе строительства.

Список литературы

1 **Леонович, И. И.** Дорожная климатология : учеб. пособие / И. И. Леонович. – Минск : БНТУ, 2012. – 285 с.

2 ТКП 697-2026. Автомобильные дороги общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. – Введ. 27.03.2026. – Минск : М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, 2026. – 91 с.

3 СТБ 1033-2016. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия. – Введ. 01.01.2017. – Минск : Госстандарт, 2016. – 24 с.

УДК 623.746-519:656.21/.22

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ПУТЕВОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Д. В. ЛЫГАНОВСКИЙ, А. С. ШИПИЛЕВ, Е. В. ПЕЧЕНЕВ,
С. А. БИНДЮК, К. Д. ДАШУК
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Железнодорожная инфраструктура требует регулярных проверок для выявления дефектов путей, повреждений конструкций, препятствий и разрастания растительности до того, как они станут угрозой безопасности. Традиционные проверки остаются необходимыми, но обследование длинных железнодорожных коридоров и труднодоступных сооружений может быть трудоемким и занимать много времени. Поэтому быстрыми темпами развивается применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые предоставляют дополнительный способ сбора данных с воздуха. Возможно применение БПЛА для мониторинга железнодорожных путей, мостов, с учетом типа датчика, установленного на беспилотном летательном аппарате.

Обычная RGB-камера подходит для обнаружения многих видимых дефектов. Тепловизионные камеры выявляют перепады температур. Мультиспектральные датчики могут использоваться для мониторинга растительности и окружающей среды.

Аэрофотоснимки высокого разрешения могут быть использованы для реконструкции железнодорожных путей и анализа таких параметров, как состояние железнодорожного пути в плане, геометрия балластной призмы.

Технология RGB-изображения остается одной из наиболее полезных для железных дорог, поскольку многие дефекты инфраструктуры носят, по сути, визуальный характер.

Камера высокого разрешения может запечатлеть: повреждение поверхности рельсов; трещины и коррозию; поврежденные или смещенные шпалы; проблемы с креплением; размыв балласта; проблемы с дренажем; поваленные деревья и другие препятствия; разрастающуюся растительность; повреждения мостов и несущих конструкций.

Кроме того, может быть отмечено обнаружение повреждений в следующих местах: *А* – стык рельса; *Б* – головка рельса; *В* – положение шпалы; *Г* – размыв балласта (рисунок 1).

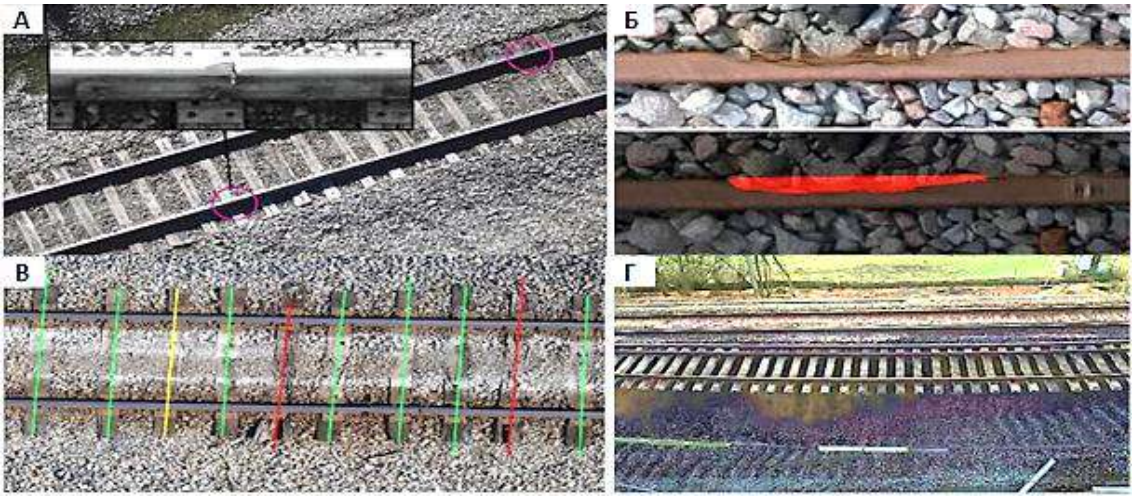


Рисунок 1 – Аэрофотосъемка железнодорожного пути

Аэрофотосъемка позволяет контролировать длинные участки пути, а также получать детальные изображения конкретных интересующих зон, особенно опасных.

Еще одно преимущество заключается в том, что полученные изображения создают постоянную цифровую запись. Вместо того, чтобы полагаться исключительно на записи об осмотре, операторы могут вернуться к исходным изображениям и сравнить их с данными более поздних миссий, чтобы отслеживать изменения во времени.

Анализ изображений также может быть автоматизирован. Компьютерное зрение и машинное обучение все чаще используются для анализа изображений, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов, помогая выявлять дефектные рельсы, препятствия, растительность и видимые неисправности инфраструктуры. Это может уменьшить объем изображений, которые необходимо просматривать вручную, и помочь отметить области, требующие более тщательного изучения.

Полученный рабочий процесс можно кратко описать следующим образом: дрон → изображение → обнаружение с помощью ИИ → результат проверки → решение о техническом обслуживании. Дрон собирает данные, а компьютерное зрение помогает преобразовать эти данные в полезную информацию для принятия решений.

В современных беспилотных технологиях используется лидар (LiDAR – Light Detection and Ranging) – технология и прибор лазерного сканирования и измерения расстояний с помощью световых импульсов. Лидар излучает лазерные импульсы и измеряет время их возврата для определения расстояний. Объединяя эти измерения с точными данными о позиционировании и ориентации, система может создавать трехмерное облако точек исследуемой территории. Для железнодорожной инфраструктуры это может обеспечить поддержку: картирования местности и высот; моделирования железнодорожного коридора; оценку состояния насыпи; обнаружения эрозии и проседания грунта; мониторинга структурных деформаций; моделирования мостов и тоннелей.

Одна из важных существующих технологий в беспилотных летательных аппаратах, которую используют, это тепловизоры. Они измеряют инфракрасное излучение, испускаемое объектами, и преобразуют разницу температур в тепловые изображения (рисунок 2).

Это делает их полезными для выявления аномалий, связанных с теплом. В железнодорожной среде тепловизионная диагностика потенциально может помочь в проверке электрических и механических компонентов, выявлении аномального нагрева и обозначении участков, требующих более тщательного исследования. Это особенно актуально для воздушных линий электропередачи и оборудования, где температурная аномалия может указывать на скрытую проблему. Тепловые данные также могут дополнять традиционный визуальный осмотр. Изображение в формате RGB может показать, что компонент выглядит нормально, в то время как тепловое изображение может выявить аномальный температурный режим.

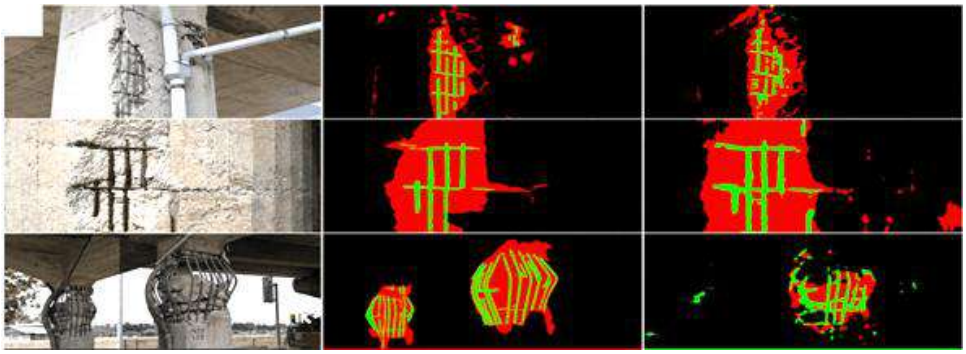


Рисунок 2 – Обнаружение повреждений на железобетонном железнодорожном мосту

В заключение можно сказать, что беспилотники позволяют охватывать большие участки железнодорожной инфраструктуры, собирая при этом данные, которые сложно или долго получать при обычных проверках.

RGB-камеры позволяют документировать видимые дефекты и состояние инфраструктуры. LiDAR предоставляет 3D-данные для картирования дорог и местности, проверки расчистки и оценки растительности. Тепловые датчики могут выявлять температурные аномалии.

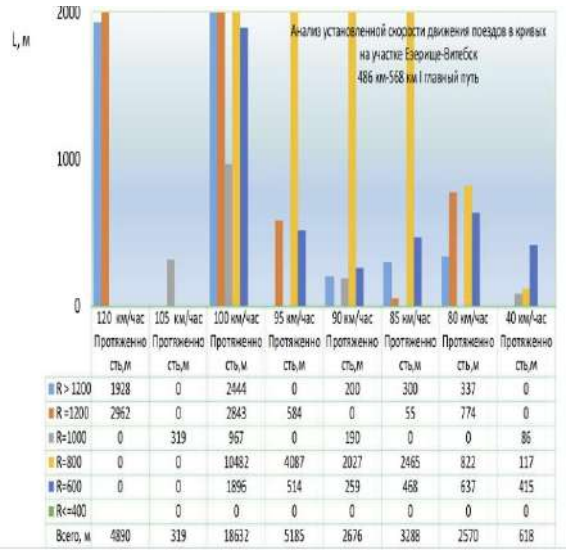
Дроны не заменяют инженеров или традиционные методы проверки. Они предоставляют еще один способ сбора, обработки и сравнения данных об инфраструктуре, помогая проверяющим группам охватывать большую территорию, выявлять участки, требующие внимания, и планировать техническое обслуживание на основе актуальной информации о местоположении.

УДК 625.1

АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИИ ПЛАНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЛИНИИ И ОГРАНИЧЕНИЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Е. М. МАСЛОВСКАЯ, Н. В. ДОВГЕЛЮК, Л. П. КОНОНОВИЧ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Скорости движения пассажирских и грузовых поездов по перегонам и станциям в зависимости от конструкции пути и типов эксплуатируемого подвижного состава устанавливаются приказом Начальника Белорусской железной дороги и предусматриваются в графике движения поездов. Установленная скорость движения поездов в кривых на I главном пути участка Витебск – Езерище приведена на рисунке 1.



	120 км/час Протяженность,м	105 км/час Протяженность,м	100 км/час Протяженность,м	95 км/час Протяженность,м	90 км/час Протяженность,м	85 км/час Протяженность,м	80 км/час Протяженность,м	40 км/час Протяженность,м
R > 1200	1928	0	2444	0	200	300	337	0
R =1200	2962	0	2843	584	0	55	774	0
R=1000	0	319	967	0	190	0	0	86
R=800	0	0	10482	4087	2027	2465	822	117
R=600	0	0	1896	514	259	468	637	415
R<=400		0	0	0	0	0	0	0
Всего, м	4890	319	18632	5185	2676	3288	2570	618

Рисунок 1 – Установленная скорость движения поездов в кривых на I главном пути участка Витебск – Езерище

Основными инфраструктурными ограничениями в хозяйстве Витебской дистанции пути являются: наличие кривых участков пути малых радиусов; дефектность земляного полотна и искусственных сооружений; ограничения скорости движения поездов: на стрелочных переводах по общему состоянию пути, на переездах [1, 2]. Характерные участки ограничений скорости представлены на рисунке 2.

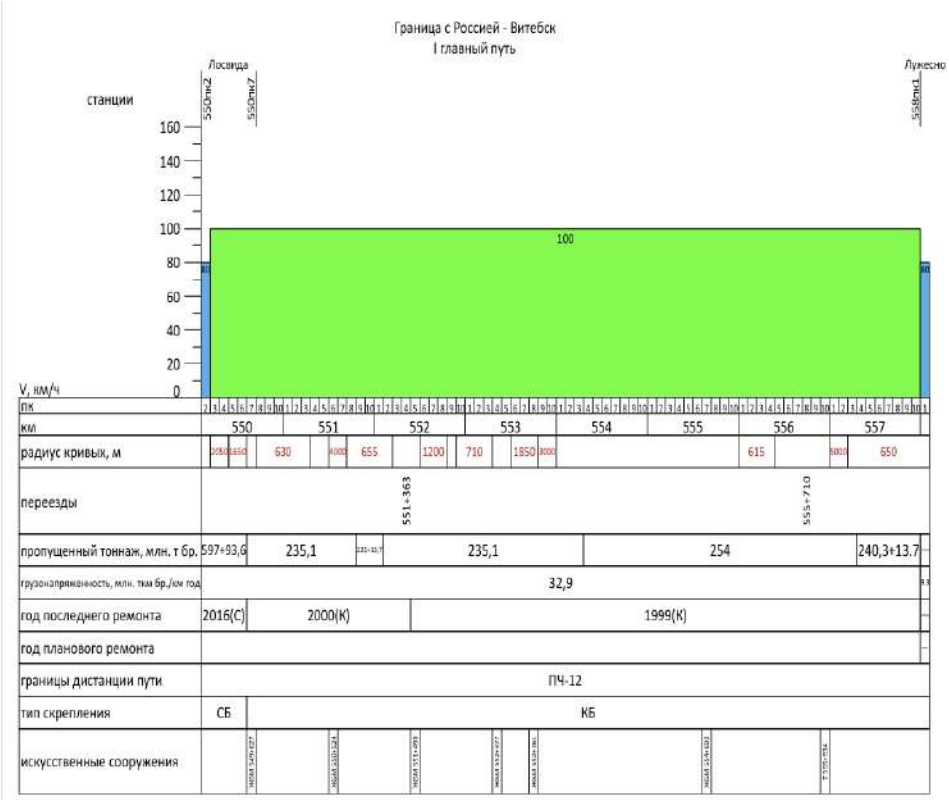


Рисунок 2 – Ограничение скорости движения поездов с технической характеристикой железнодорожной лини

Реконструкция участка железной дороги Витебск – Езерище подразумевает: увеличение радиусов кривых; замену составных кривых на однорадиусные; удлинение переходных кривых и прямых вставок; вынос из кривых стрелочных переводов, расположенных на главных путях; замену на главных путях обычных стрелочных переводов на скоростные; улучшение плана и профиля пути; реконструкцию искусственных сооружений или строительство новых сооружений в связи со сдвижкой пути при переустройстве его плана. Также предусматривается расширение или перенос пассажирских платформ; реконструкция пешеходных мостов и тоннелей; устройство пересечений с автодорогами в разных уровнях и др. Решение этих и других задач позволит снять инфраструктурные ограничения и переустроить проблемные места.

Средняя протяженность кривых участков по Белорусской железной дороге составляет около 25 %, в том числе протяженность существующих кривых на участке Витебск – Езерище составляет в среднем 45 % от общей длины участка, что указывает на сложность участка и обозначает требования к его реконструкции и модернизации.

Список литературы

1 Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года : одобр. на заседании Президиума Совета Министров Респ. Беларусь (протокол от 02.05.2017 № 10). – Минск, 2017. – 148 с.

2 **Турбин, И. В.** Изыскания и проектирование железных дорог : учеб. для вузов / И. В. Турбин. – М. : Транспорт, 1989. – 479 с.

УДК 625.7/.8

УСТРОЙСТВО И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ СОПРЯЖЕНИЯ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО И АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

В. Л. МИТЬКОВ, В. А. АЛМАБЕКОВ
ОАО «Дорожно-строительный трест № 2», г. Гомель, Республика Беларусь

И. М. ЦАРЕНКОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Дорожное хозяйство является ключевым элементом экономики страны, обеспечивающим устойчивое развитие и её конкурентоспособность. В настоящее время протяженность республиканских автомобильных дорог составляет 15 944 км. Из них асфальтобетонное покрытие имеют 15 437 км дорог (96,9 %); цементобетонное покрытие – 333 км (2,1 %); гравийное покрытие – 174 км (1,1 %). Местные автомобильные дороги при общей протяженности в 70 594 км также имеют незначительную долю в своем составе дорог с цементобетонным покрытием – 1,2 % (861 км). Асфальтобетонное покрытие на местной дорожной сети устроено на 32 662 км (46,3 %), также значительна доля гравийных, щебеночных и грунтовых покрытий – 52,5 % (36 401 км).

В соответствии с Указом Президента Республики Беларусь № 31 от 17 января 2025 года развитие транспортной инфраструктуры является одной из стратегических задач в рамках объявленной на 2025–2029 годы пятилетки качества. Пути повышения качественных показателей и улучшения транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог затрагивают прежде всего конструкционные и технологические аспекты дорожного строительства.

В Республике Беларусь активно развиваются технологии устройства цементобетонных покрытий. Долговечность и безопасность проезда по автомобильным дорогам с цементобетонным покрытием очень высоки. Республика Беларусь обладает всем необходимым для производства цемента. При этом нет зависимости от битума, стоимость которого формируется на внешних рынках. В рамках государственной программы «Дороги Беларуси» до 2030 года планируется построить около 175 км цементобетонных дорог – это втрое больше, чем в предыдущую пятилетку.

Практическая реализация поставленных целей сталкивается с рядом вызовов, в числе которых и то, что значительная часть автомобильных дорог, на которых реализуются проекты реконструкции с устройством жесткой дорожной одежды, изначально имеет асфальтобетонное покрытие. Опыт работы дорожно-строительных организаций на таких объектах показывает, что одной из самых актуальных проблем при этом является несовместимость физико-механических характеристик материалов. Для асфальтобетона характерен коагуляционный тип структуры, для цементобетона – кристаллизационный. Это приводит к разнице в теплотехнических характеристиках, особенно в коэффициенте линейного расширения.

Для устройства цементобетонных слоев усиления используют смести из тяжелого бетона. Основой расчета цементобетонных слоев усиления асфальтобетонных покрытий является сопоставление напряжений, возникающих в цементобетонном слое усиления под действием транспортных нагрузок и природно-климатических факторов, с расчетным сопротивлением цементобетона. Требуемые показатели прочности назначают с учетом принятой расчетной нагрузки, ее суммарной повторяемости за срок службы дорожной одежды, типа слоя усиления асфальтобетонного покрытия, общей толщины дорожной одежды, дорожно-климатической зоны и грунтово-гидрологических условий на обследуемом участке дороги.

Толщину цементобетонных слоев усиления асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог рассчитывают в два этапа. На первом этапе выполняют расчет по прочности толщины слоя усиления с применением существующих методов расчета жестких плит на упругом основании. Расчет дорожной конструкции производят послойно снизу вверх. На втором этапе осуществляют уточнение толщины цементобетонного слоя с учетом влияния асфальтобетонного слоя на совместную работу конструкции в зависимости от его толщины, прочности (модуля упругости) и величины сил трения-сцепления между слоями цементо- и асфальтобетона.

Напряжения в цементобетонном слое усиления возникают не только вследствие нагрузки от колес автомобилей, но и в результате неравномерного распределения температуры по толщине слоя, а также суточных, сезонных, годовых колебаний температуры. Температурные напряжения тем значительнее, чем больше размеры плит цементобетонного слоя усиления в плане и выше температурный перепад.

При стыковке полос при реконструкции, где старая полоса – асфальтобетон, а новая устраивается из цементобетонной смеси, критическим узлом является продольный шов, от которого зависит долговечность всей дорожной одежды.

Основное назначение продольного шва на стыке цементобетонного и асфальтобетонного покрытий – герметизация стыка для предотвращения проникновения влаги и компенсация разницы температурных деформаций двух разнородных материалов. Конструкция камеры такого шва совпадает с типичными конструкциями шва сжатия. Данные швы зачастую устраиваются для соединения цементобетонных покрытий искусственных взлетно-посадочных полос и перронов с асфальтобетонной обочиной, для соединения покрытий автозаправочных станций, жилых и технических проездов с существующими асфальтированными дорогами. При этом обязательно нужно следить, чтобы продольный стык верхней укладки обязательно проходил над сопряжением старой дорожной одежды и новой полосы.

Цель этих швов – предотвратить образование трещин и сколов на стыке двух разных покрытий, и обеспечить защиту от попадания влаги. Цементобетон и асфальтобетон имеют разную пористость и водопроницаемость. Без надежного шва влага проникает в нижележащие слои основания, что приводит к их разуплотнению, просадкам и преждевременному разрушению покрытия. Цементобетон и асфальтобетон по-разному реагируют на изменения температуры. Коэффициент температурного расширения у цементобетона значительно ниже, чем у асфальтобетона. Жесткий шов приводил бы к образованию трещин и сколов на границе материалов. Устройство деформационного шва позволяет компенсировать эти подвижки.

Вариант сопряжения цементобетонного и асфальтобетонного покрытий состоит в том, что на границе стыка нарезчиком швов устраивают шов шириной 10 мм и глубиной 40 мм, укладывают уплотнительный термостойкий шнур диаметром 13 мм, предварительно обработав стенки шва грунтовкой по СТБ 1395, и герметизируют мастикой по СТБ 1092. Узел сопряжения представлен на рисунке 1.

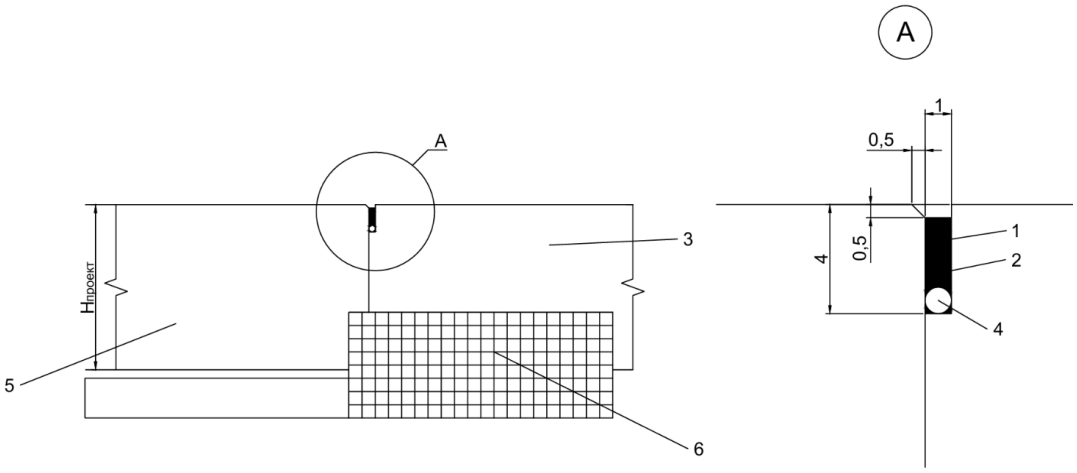


Рисунок 1 – Узел сопряжения асфальтобетонного и цементобетонного покрытий:
$H_{проект}$ – проектная толщина плиты;
1 – битумно-полимерная мастика; *2* – полимерная грунтовка; *3* – асфальтобетон;
4 – уплотнительный термостойкий шнур; *5* – цементобетон; *6* – основание

Второй вариант состоит в том, что при сопряжении цементобетонного покрытия с асфальтобетонным покрытием укрепленной полосы на обочине или разделительной полосе на границе стыка цементобетонного и асфальтобетонного покрытий устраивают продольные и поперечные швы, герметизируемые с помощью битумной ленты высотой 40–50 мм, толщиной 4 мм по СТБ 1937, которую устанавливают на боковую грань цементобетонного покрытия в одном уровне с поверхностью.

УДК 625.1:528.4

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ МОСТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

А. О. МИХАЛЬКОВ, Я. М. ГРИЩЕНКОВ, В. В. ПЕТРУСЕВИЧ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Современная транспортная инфраструктура во многом зависит от надежности и долговечности мостовых сооружений, их опорных частей, пролетных строений и некоторых других элементов. Автомобильные мосты ежедневно испытывают значительные нагрузки, связанные с интенсивностью транспортного потока, воздействием окружающей среды и постепенным износом конструкционных материалов. С течением времени эти факторы могут приводить к снижению прочности конструкций, образованию дефектов и необходимости проведения дорогостоящего ремонта. В связи с этим особую актуальность приобретает использование современных цифровых технологий, позволяющих заранее прогнозировать состояние мостовых сооружений и оценивать влияние различных эксплуатационных факторов на их срок службы [1]. Одним из перспективных направлений является разработка специализированных программных систем, способных моделировать условия эксплуатации мостов и анализировать их влияние на долговечность конструкций.

В рамках данной работы рассматривается концепция создания программного комплекса, предназначенного для прогнозирования прочностных характеристик и срока службы автомобильных мостов на основе анализа различных параметров эксплуатации. Основная идея проекта заключается в создании системы, в которой пользователь может задавать определенные условия, характеризующие окружающую среду и эксплуатационные нагрузки, после чего программа будет рассчитывать предполагаемое влияние этих факторов на состояние мостовой конструкции, возможные дефекты, предполагаемый ремонт сооружений. Подобный инструмент может быть полезен как на этапе проектирования мостов, так и при их эксплуатации и планировании ремонтных работ [2].

Предполагаемая программа представляет собой интеллектуальную систему моделирования, способную анализировать влияние совокупности факторов (таких как влажность, сухость воздуха, температура и т. д.) на долговечность мостовых сооружений. Пользователь системы сможет задавать различные параметры, такие как температура окружающей среды, уровень влажности, характеристики используемых строительных материалов, интенсивность транспортной нагрузки и другие условия эксплуатации. После ввода исходных данных программа будет проводить анализ и формировать прогноз, отражающий возможные изменения прочности конструкции, степень ее износа и предполагаемый срок службы.

Особенностью разрабатываемой системы является использование научных данных в качестве основы для анализа. Предполагается, что программа будет опираться на информацию, полученную из научных исследований и специализированных публикаций, в которых рассматривается влияние различных факторов на прочностные характеристики мостовых конструкций. В научной литературе достаточно подробно описано, каким образом температурные колебания, влажность, воздействие агрессивных сред и транспортные нагрузки влияют на состояние материалов и элементов мостовых сооружений [3]. Эти данные могут быть структурированы и использованы в программной системе в виде базы знаний, содержащей соответствующие зависимости и коэффициенты.

После выбора пользователем необходимых параметров программа будет сопоставлять введенные данные с информацией, содержащейся в базе научных исследований. Далее полученные данные будут передаваться в модуль анализа, который будет выполнять обработку информации и формировать итоговый результат. В качестве одного из ключевых элементов системы предполагается использование технологий искусственного интеллекта. Модуль искусственного интеллекта будет анализировать совокупность факторов и выявлять взаимосвязи между ними, что позволит получать более точные и комплексные прогнозы состояния мостовых конструкций.

Результаты работы программы предполагается представлять пользователю в наглядной форме. Это могут быть прогнозные значения срока службы мостовой конструкции, оценка изменения ее прочностных характеристик, вероятность возникновения определенных видов повреждений, а так-

же графические материалы, демонстрирующие влияние выбранных параметров на состояние сооружения. Такой подход позволит специалистам быстро оценивать возможные последствия различных условий эксплуатации и принимать более обоснованные инженерные решения.

Практическая значимость разработки подобной системы заключается в возможности повышения эффективности управления транспортной инфраструктурой. Использование программных инструментов прогнозирования позволит заранее выявлять потенциальные проблемы в эксплуатации мостов и своевременно планировать проведение ремонтных работ. Это особенно важно в условиях ограниченных ресурсов, когда необходимо рационально распределять средства, направляемые на содержание и реконструкцию инфраструктурных объектов.

Кроме того, подобная программа может быть полезна на этапе проектирования новых мостовых сооружений. Моделирование различных условий эксплуатации позволит инженерам выбирать оптимальные материалы и конструктивные решения, которые обеспечат максимальную долговечность и надежность будущих объектов [4]. Возможность анализа различных сценариев эксплуатации также позволит учитывать климатические особенности конкретных регионов и адаптировать конструкции мостов к реальным условиям их использования.

Следует отметить, что на данный момент разработка программной системы находится на стадии формирования концепции и разработки основных алгоритмов работы. В дальнейшем планируется расширение базы научных данных, совершенствование методов обработки информации и внедрение дополнительных параметров, способных влиять на состояние мостовых сооружений. Также предполагается развитие интерфейса программы и повышение удобства ее использования для специалистов различных областей, связанных с проектированием и эксплуатацией транспортной инфраструктуры.

Таким образом, разработка интеллектуальной системы прогнозирования состояния автомобильных мостов представляет собой перспективное направление развития цифровых технологий в области инженерной инфраструктуры. Предполагается внедрение программного обеспечения также и в другие сферы транспорта, и не только. Такие программы могут предугадать развитие дефектов либо сроки эксплуатации на месте различных инженерных сооружений, что позволит лучше и быстрее производить ремонты и некоторые работы над сооружением. Использование научных данных и методов искусственного интеллекта позволит создавать более точные модели оценки долговечности мостовых конструкций и повысить эффективность их эксплуатации. В дальнейшем подобные системы могут стать важным инструментом для специалистов, занимающихся проектированием, мониторингом и обслуживанием мостовых сооружений и иных искусственных сооружений [5], а также способствовать повышению безопасности транспортной сети в целом. Развитие транспортной сферы в этом направлении в настоящее время необходимо.

Список литературы

1 **Ермошин, Н. А.** Метод прогнозирования долговечности дорожных сооружений / Н. А. Ермошин, Д. Ю. Кириллова // Transportation Systems and Technology. – 2023. – Т. 9, № 4. – С. 46–58.

2 **Шестакова, Е. Б.** Экспериментальная оценка работоспособности искусственного интеллекта при выборе вида ремонтных работ на мостах / Е. Б. Шестакова, А. А. Белый // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2026. – Т. 12, № 2. – С. 298–316.

3 **Петрусевич, В. В.** Устройство шероховатых поверхностных слоёв на мостовых сооружениях / В. В. Петрусевич, П. А. Кацубо // Строительство и восстановление искусственных сооружений : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. ; под общ. ред. А. А. Поддубного. – Гомель, 2020. – С. 88–91.

4 **Петрусевич, В. В.** Сборно-разборный быстровозводимый мост / В. В. Петрусевич, П. А. Кацубо // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы V Междунар. науч.-техн. конф., 18–19 дек. 2025 г., Минск / сост.: Е. М. Жуковский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2026. – С. 443–447.

5 **Шипилев, А. С.** Применение системы пространственного сканирования состояния искусственных сооружений в противодействии терроризму / А. С. Шипилев, В. В. Петрусевич, Я. В. Шутов // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж. д. (Гомель, 24–25 нояб. 2022 г.) : в 2 ч. / Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель, 2022. – Ч. 2. – С. 433–434.

УДК 625.1:658.382

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ МАЛОДЕЯТЕЛЬНЫХ РАЗДЕЛЬНЫХ ПУНКТОВ

М. Ю. НИКИТЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Обеспечение безопасности движения поездов и охраны труда при производстве путевых работ является системообразующим фактором функционирования железнодорожного транспорта. В условиях ограниченных инвестиционных ресурсов оптимизация путевого развития малодеятельных раздельных пунктов, утративших свои функции вследствие изменения грузопотоков или технического состояния, приобретает существенное значение. Ликвидация избыточных станционных путей и стрелочных переводов сокращает эксплуатационные расходы и повышает уровень безопасности за счёт исключения потенциально опасных зон, связанных с маневровой работой, ручным переводом стрелок и содержанием устройств СЦБ.

Анализ эксплуатационной деятельности показывает, что при существующей грузонапряжённости операции по скрещению и обгону поездов могут выполняться на соседних станциях без нарушения графика движения. При этом содержание стрелочных переводов, устройств автоматики и контактной сети малодеятельного пункта требует постоянных затрат, а отказы технических средств приводят к задержкам поездов. В данных условиях ликвидация раздельного пункта с переустройством путевого развития в единый главный путь является технически обоснованным и экономически целесообразным решением. Производство работ регламентируется действующими Правилами технической эксплуатации железной дороги Республики Беларусь [1] и отраслевыми стандартами по текущему содержанию пути [2].

Технология демонтажа стрелочных переводов представляет собой наиболее сложный и травмоопасный этап работ. Например, перевод типа Р65 марки 1/11 имеет значительную массу (металлические части без брусьев – около 160 т) и габаритную длину, что исключает возможность его перемещения целиком. Обосновано разделение перевода на три монтажных блока – рамный, соединительный (переводной кривой) и крестовинный, – что позволяет выполнять демонтаж краном УК-25/СП с соблюдением требуемых габаритов и минимальным временем нахождения работников в опасной зоне. Перед началом работ производится шурфовка кабельных трасс, выключение изолированного участка из централизации и снятие напряжения с контактной сети, что исключает ложные срабатывания рельсовых цепей и поражение электрическим током. Порядок ограждения и производства работ регламентируется действующими отраслевыми стандартами и правилами по охране труда [3].

При переустройстве путевого развития в единый главный путь технологически обоснованным является переход на конструкцию бесстыкового пути. Это определяет необходимость замены временных инвентарных рельсов на сварные рельсовые плети. Данная технология предусматривает закрепление плетей в оптимальном температурном интервале, контроль продольных угонов плетей и последующую выправку пути. Соблюдение температурного режима исключает выбросы пути и разрывы плетей, которые относятся к наиболее опасным отказам бесстыкового пути. Комплекс работ выполняется в технологическое «окно» продолжительностью около 5 часов (в пределах 4–6 часов), что соответствует типовым нормативным значениям для однопутных участков и обеспечивает возможность открытия движения с установленными скоростями после завершения всех операций [4].

Организация работ в «окно» предполагает распределение обязанностей между руководителем работ, сигналистами, стропальщиками и машинистами путевых машин. Ограждение места производства работ выполняется переносными сигналами остановки, красными щитами и петардами в соответствии с действующими инструкциями. Технологическим требованием является оповещение работников о приближении поездов по соседнему пути, а также контроль за выводом людей в безопасную зону перед пропуском подвижного состава.

Экономическая целесообразность переустройства подтверждается расчетом, выполненным согласно отраслевой методике определения экономического эффекта при распоряжении и списании имущества [5]. Эффект от ликвидации объекта определяется как разница между стоимостью опри-

ходованных материальных ценностей (дохода от реализации высвобождаемого металлолома и годных материалов верхнего строения пути) и затратами на демонтаж и вывоз строительного мусора. Поскольку остаточная стоимость объекта равна нулю вследствие полной амортизации, расчет показывает положительный разовый экономический эффект. Структура формирования данного эффекта представлена на рисунке 1.

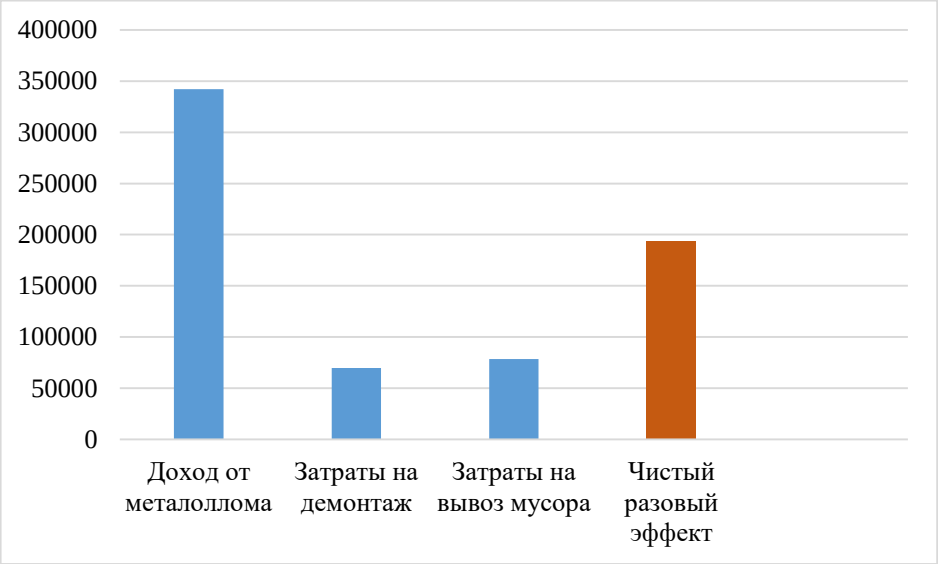


Рисунок 1 – Структура разового экономического эффекта
от ликвидации малодеятельного раздельного пункта

Помимо разового экономического эффекта, ликвидация раздельного пункта обеспечивает устойчивое сокращение ежегодных эксплуатационных расходов на текущее содержание пути, стрелочных переводов и электроснабжения. Демонтаж неиспользуемой инфраструктуры исключает необходимость постоянного обслуживания объекта, что позволяет перераспределить трудовые ресурсы на участки с более высокой интенсивностью движения. Сокращение объемов работ по текущему содержанию снижает влияние человеческого фактора, а также риски возникновения отказов технических средств и связанных с ними нарушений графика движения поездов. Следовательно, внедрение ресурсосберегающих технологий не только требует минимальных затрат и повышает эффективность использования государственного имущества, но и обеспечивает неразрывную связь экономической целесообразности с повышением общего уровня безопасности транспортной инфраструктуры.

Таким образом, предложенные технологические решения формируют комплексную модель ликвидации малодеятельных раздельных пунктов, обеспечивающую сбалансированное сочетание требований безопасности и экономической эффективности. Это создаёт предпосылки для широкого практического применения данных схем при переустройствах аналогичных объектов на сети железных дорог.

Список литературы

1 Правила технической эксплуатации железной дороги Республики Беларусь : утв. постановлением М-ва трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь 25.11.2015 г. № 52. – Минск : Бел. ж. д., 2016. – 190 с.

2 Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ : СТП 09150.56.010-2005 : введ. 01.07.2006. – Минск : Бел. ж. д., 2006. – 284 с.

3 Правила по охране труда при содержании и ремонте железнодорожного пути и сооружений в государственном объединении «Белорусская железная дорога» : утв. приказом Начальника Бел. ж. д. от 01.08.2016 № 248Н. – Минск : Бел. ж. д., 2016.

4 Инструкция по движению поездов и маневровой работе на железнодорожном транспорте в Республике Беларусь : утв. приказом Начальника Бел. ж. д. от 04.12.2016 № 292Н. – Минск : Бел. ж. д., 2016. – 157 с.

5 Методика расчета экономического эффекта при распоряжении, списании, вовлечении в хозяйственный оборот объектов недвижимого имущества, земельных участков государственного объединения «Белорусская железная дорога» : утв. приказом Начальника Бел. ж. д. от 29.11.2018 № 1002НЗ. – Минск, 2018.

УДК 528.4

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРИБОРНОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

М. Ю. НИКИТЕНКО, Н. С. СЫРОВА, И. П. ДРАЛОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Современная транспортная инфраструктура представляет собой сложный комплекс, включающий не только подвижной состав и пути сообщения, но и системы энергоснабжения, сигнализации, связи и управления. Электрические сети напряжением 0,4–10 кВ обеспечивают работу тяговых подстанций, устройств централизации и блокировки, освещения, а также систем диспетчерского контроля. Повреждение подземных кабельных линий или воздушных линий электропередачи может привести к остановке движения, авариям и созданию угрозы для жизни и здоровья людей. В связи с этим вопросы безопасности при реконструкции и эксплуатации электрических сетей, обслуживающих транспортные объекты, приобретают особую актуальность. Одним из ключевых условий безопасного производства работ является наличие достоверной информации о фактическом положении всех инженерных коммуникаций, как наземных, так и подземных. Получить такие данные позволяет комплекс инженерно-геодезических изысканий, выполняемых с использованием высокоточного цифрового оборудования [1, 4].

При реконструкции электрических сетей на объектах транспортной инфраструктуры выполняется комплекс полевых и камеральных работ. Основной задачей является создание топографических планов масштаба 1:500 и совмещение их со схемами подземных коммуникаций [2]. Для этого применяются приведенные ниже технологии и приборы.

Электронный тахеометр LEICA TS07. Данный прибор используется для горизонтальной и вертикальной съемки застроенных территорий полярным способом. Тахеометр позволяет измерять углы и расстояния с высокой точностью, автоматически регистрировать данные и передавать их в ТИМ-системы для дальнейшей обработки. Прибор регулярно проходит метрологическое освидетельствование, что гарантирует единство и точность измерений.

Спутниковые измерения в режиме RTK. Для создания съемочного обоснования применяются GNSS-приемники, работающие в режиме реального времени (Real-Time Kinematic). Это позволяет определять координаты точек с сантиметровой точностью непосредственно в полевых условиях. Точки планово-высотного обоснования закрепляются центрами люков смотровых колодцев, металлическими штырями или закоординированными углами капитальных зданий. Уравнивание съемочного обоснования производится в автоматизированном режиме с использованием ТИМ.

Трубокабелеискатель DEGICAT 200. Для обследования и съемки подземных коммуникаций используется данный прибор, позволяющий обнаруживать безколодезные прокладки, определять их местоположение и глубину заложения. Дополнительно применяется глубинная рейка для нивелирования колодцев, определения материала и диаметра вводов, установления связей между колодцами. Полнота нанесения подземных коммуникаций согласуется с эксплуатирующими организациями.

Камеральная обработка полевых материалов выполняется с использованием таких программных комплексов как: «ТИМ КРЕДО ТРАНСФОРМ», «ТИМ КРЕДО ТОПОГРАФИЯ» и «ТИМ КРЭДО ЛИНЕЙНЫЕ СООРУЖЕНИЯ», ТИМ Топоматик Robur – Изыскания, ТИМ Топоматик Robur – Инженерные сети. Они позволяют оцифровывать растровые подложки, создавать цифровые модели местности, формировать топографические планы в различных форматах (dxf, dwg и т. д.) и проектировать инженерные сети. Планы совмещают топографическую основу с подземными коммуникациями и их техническими характеристиками [3].

Полученные в результате изысканий данные позволяют решить ряд задач, непосредственно влияющих на безопасность перевозочного процесса: точно определить положение существующих электрических сетей и других коммуникаций, что исключает их случайное повреждение при производстве земляных работ; выявить несоответствия между проектными и фактическими данными, что особенно важно при реконструкции; согласовать полноту нанесения подземных коммуникаций с эксплуатирующими организациями; создать достоверные цифровые топографические планы для проектирования новых участков сетей и их безопасной эксплуатации.

Безопасность при реконструкции электрических сетей обеспечивается не только точностью приборов, но и четкой организацией работ. На подготовительном этапе выполняется сбор и анализ архивных материалов, обследование участка, согласование границ работ с эксплуатирующими организациями. Это позволяет заранее выявить потенциально опасные зоны, где проходят действующие кабельные линии, и исключить их случайное повреждение.

В процессе полевых работ особое внимание уделяется контролю качества. Полевой контроль осуществляется путём визуального просмотра топографических планов и набора контрольных пикетов. Все измерения выполняются с соблюдением требований нормативных документов, а применяемые приборы регулярно проходят метрологическое освидетельствование. Результаты контроля фиксируются в акте приёмки, что гарантирует достоверность полученных данных [1, 2].

Отдельно стоит отметить важность выявления несоответствий между проектной и фактической документацией. При реконструкции часто обнаруживается, что реальное положение кабелей отличается от указанного в старых чертежах. Своевременное выявление таких расхождений предотвращает аварии при земляных работах и обеспечивает надёжность электроснабжения транспортных объектов [1, 2].

Точность и полнота геодезической информации напрямую влияют на безопасность движения транспорта. Например, при реконструкции кабельных линий, питающих устройства сигнализации и связи на железной дороге, ошибка в определении глубины заложения или местоположения кабеля может привести к его повреждению, что вызовет отказ системы управления движением. Для городского электротранспорта (трамвай, троллейбус) также надежность электроснабжения критична для безопасности пассажиров. Кроме того, использование современных приборов и программного обеспечения позволяет сократить сроки изысканий и повысить их качество, что снижает риски возникновения аварийных ситуаций. Важно отметить, что все работы выполняются в соответствии со строительными нормами и правилами, действующими на территории Республики Беларусь, что гарантирует необходимый уровень безопасности.

Безопасность функционирования объектов транспортной инфраструктуры неразрывно связана с надежностью электроснабжения. Реконструкция электрических сетей должна сопровождаться детальными инженерно-геодезическими изысканиями с применением цифрового высокоточного и высокотехнологичного оборудования: электронных тахеометров, спутниковых RTK-приемников, трубокабелеискателей. Программные комплексы позволяют создавать цифровые планы, которые служат основой для безопасного производства работ и дальнейшей эксплуатации объектов. Такой комплексный подход обеспечивает предотвращение аварий, защиту жизни и здоровья людей, а также бесперебойную работу транспорта [4, 5].

Таким образом, применение современных геодезических технологий, приборного контроля и соответствующего программного обеспечения является неотъемлемым условием обеспечения безопасности на транспорте при реконструкции и обслуживании электрических сетей.

Список литературы

1 СН 1.02.01-2019. Инженерные изыскания для строительства : утв. постановлением М-ва архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь от 26 дек. 2019 г. № 74 : введ. 21.09.2020. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 180 с.

2 СП 1.02.03-2025. Инженерные изыскания для строительства. Условные обозначения для инженерно-топографических планов масштабов 1:1000, 1:500, 1:200 : утв. постановлением М-ва архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь от 24 дек. 2025 г. № 153 : введ. 01.03.2026. – Минск : Минстройархитектуры, 2025. – 131 с.

3 **Атрошко, Е. К.** Прикладная геодезия и современные инженерно-геодезические технологии : учеб.-метод. пособие / Е. К. Атрошко, И. П. Дралова, Н. С. Сырова. – Гомель : БелГУТ, 2023. – 97 с.

4 **Сырова, Н. С.** Геодезические технологии в контексте экологической безопасности / Н. С. Сырова, И. П. Дралова, М. Ю. Никитенко // Проблемы техносферной и экологической безопасности в промышленности, строительстве и городском хозяйстве : материалы III Междунар. науч. конф., Макеевка, 13 февр. 2025 г. – Макеевка : Донбас. нац. акад. стр-ва и архитектуры, 2025. – С. 256–259.

5 **Сырова, Н. С.** Геодезические аспекты охраны окружающей среды и заповедного дела / Н. С. Сырова, И. П. Дралова, М. Ю. Никитенко // Журналистика и география : сб. материалов IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Воронеж, 20–21 марта 2026 г. В 2 т. Т. 2. – Воронеж : Кварта, 2026. – С. 31–33.

УДК 625.76.08

ТЕКУЩИЙ РЕМОНТ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ВЫБОРОМ ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ НАРЕЗКИ «КАРТ» ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ВЫБОИН

Е. А. НИКИТИН
Дорожно-эксплуатационное управление № 23 филиала РУП «Брествтодор», Республика Беларусь
Г. В. АХРАМЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Обеспечение ровности и сплошности дорожных покрытий является важнейшим условием безопасности дорожного движения и сохранности транспортных средств. Среди дефектов покрытий нежёсткого типа наиболее распространёнными являются выбоины, возникающие вследствие локального нарушения структуры асфальтобетона под воздействием транспортных нагрузок, влаги и знакопеременных температур. Ямочный ремонт относится к наиболее массовым видам текущего ремонта, а его качество напрямую определяет долговечность дорожной одежды. Своевременное устранение выбоин позволяет предотвратить прогрессирующее разрушение покрытия, однако практика показывает, что нередко отремонтированные участки выходят из строя уже через несколько месяцев после окончания работ. Одной из основных причин такого положения является неоптимальная геометрия ремонтной карты, приводящая к концентрации напряжений на границе старого и нового материала и, как следствие, к преждевременному разрушению заплаты [1].

Действующие технические нормативные правовые акты, в частности ТКП 059.1-2023, устанавливают общие требования к подготовке ремонтируемых мест, предусматривая придание им прямоугольной или квадратной формы с вертикальными стенками и очистку от пыли и слабодержащихся частиц [1]. Однако практика показывает, что выбор конкретных пропорций карты, ориентации её сторон относительно направления движения, а также обработки кромок часто осуществляется интуитивно, без учёта особенностей распределения напряжений в зоне сопряжения. В то же время исследования в области механики дорожных одежд свидетельствуют, что форма и размеры карты оказывают непосредственное влияние на концентрацию касательных и нормальных напряжений у границ ремонтного слоя, особенно в угловых зонах.

Анализ литературных источников и производственного опыта показывает, что в настоящее время применяются несколько типовых форм ремонтных карт: квадратная, прямоугольная с произвольным соотношением сторон, реже – многоугольная или круглая. Квадратная форма технологична в исполнении, однако при действии горизонтальных сил от колёс автомобилей в её углах возникают значительные пиковые напряжения, способствующие образованию трещин и последующему выкрашиванию краёв [2]. Прямоугольная форма, у которой длинная сторона ориентирована вдоль направления движения, считается более предпочтительной, так как обеспечивает более плавное перераспределение усилий при наезде колеса. Экспериментальные данные, приведённые в работе [3], показывают, что соотношение сторон 1:1,5–1:2 позволяет снизить концентрацию напряжений в углах до 25–30 % по сравнению с квадратом. Кроме того, при таком расположении уменьшается вероятность образования поперечных трещин на границе стыка, поскольку фронт нагружения перемещается постепенно.

Наряду с прямоугольной формой в отдельных случаях рассматриваются круглые и овальные карты, которые теоретически лишены концентраторов напряжений в виде острых углов. Однако их практическое применение ограничено сложностью нарезки и нерациональным использованием материала: при одинаковой площади ремонта периметр круглой карты меньше, но технология её создания требует специального оборудования (кольцевых фрез), которое не всегда доступно дорожным организациям. Кроме того, круглая форма хуже вписывается в существующую сетку трещин и не позволяет эффективно перекрывать все ослабленные зоны.

Численное моделирование методом конечных элементов, выполненное в ряде исследований, подтверждает эмпирические выводы. Расчёты показывают, что при соотношении сторон 1:1,5 и ориентации длинной стороны вдоль оси движения максимальные растягивающие напряжения в асфальтобетоне снижаются на 18–25 % по сравнению с квадратной картой. Ещё более эффективным является применение скошенных или скруглённых углов с радиусом 15–20 мм, что позволяет прак-

тически полностью исключить сингулярность напряжений в вершинах. Таким образом, оптимальной является прямоугольная карта с соотношением сторон 1:1,5–1:2, углами, срезанными под 45° или скруглёнными, и вертикальными либо слегка наклонными стенками.

Немаловажным фактором является геометрия кромок нарезаемой карты. Вертикальные стенки, получаемые при использовании нарезчиков швов с алмазными дисками, обеспечивают максимальную площадь контакта и чёткую фиксацию нового материала. Однако острые углы между стенкой и дном карты становятся концентраторами напряжений. Для их устранения целесообразно выполнять лёгкое скругление углов радиусом 15–20 мм либо придавать стенкам карты небольшой уклон (1:10) в сторону от центра. Это позволяет снизить вероятность сколов кромок при уплотнении и в процессе эксплуатации [2]. Следует отметить, что применение наклонных стенок (под углом 45° и более) не рекомендуется, так как уменьшает площадь сцепления и способствует выдавливанию ремонтного материала под нагрузкой.

Выбор глубины нарезки также взаимосвязан с формой карты. При разрушении верхнего слоя покрытия глубина выреза должна соответствовать толщине слоя, подлежащего замене, но не менее 50 мм для горячих смесей. Если выбоина затрагивает несколько слоёв асфальтобетона, нарезку производят ступенчато – с уступами по 30–50 мм, обеспечивая перевязку швов. При этом форма каждой ступени повторяет выбранную геометрию внешнего контура. Исследования, выполненные в БелдорНИИ, показывают, что ступенчатая нарезка с прямоугольным внешним контуром и срезанными углами увеличивает сдвигоустойчивость заплаты на 15–20 % по сравнению с бессистемной вырубкой [4].

Технологическая последовательность работ по нарезке карты включает разметку контура с учётом требуемых размеров и ориентации, прорезание кромок нарезчиком швов на глубину ремонтного слоя, удаление материала внутри контура с помощью отбойных молотков или малогабаритных фрез, очистку полученной полости от пыли и крошки сжатым воздухом, обработку стенок и дна битумной эмульсией или горячим битумом. Нарезка должна выполняться по возможности прямолинейно, без изломов и сколов, так как любое отклонение от прямого угла в плане увеличивает вероятность появления трещин в примыкающем старом покрытии [5]. Для обеспечения точности геометрии применяются металлические шаблоны или разметочные рамки, особенно при большом количестве однотипных дефектов. Важно, чтобы ширина карты была не менее ширины следа колеса (0,3–0,4 м), а длина захватывала всю зону ослабленного материала, включая скрытые трещины. При выявлении сетки трещин, прилегающей к выбоине, границы карты расширяют до неповреждённого покрытия, но не менее чем на 0,1 м в каждую сторону.

Контроль качества подготовки карты включает проверку геометрических размеров (отклонение от прямолинейности кромок не должно превышать 5 мм на 1 м), вертикальности стенок, чистоты поверхности и равномерности подгрунтовки. Таким образом, оптимальной формой нарезки «карт» при ликвидации выбоин следует считать прямоугольную, ориентированную длинной стороной вдоль оси движения, с соотношением сторон 1:1,5–1:2, вертикальными или с малым уклоном стенками, скруглёнными или срезанными под 45° углами, а при многослойном ремонте – со ступенчатым профилем. Такая конфигурация обеспечивает наилучшее распределение напряжений в зоне контакта, повышает адгезионную прочность и снижает вероятность повторного разрушения в течение гарантийного срока. Внедрение данного подхода в практику текущего ремонта автомобильных дорог Республики Беларусь позволит повысить качество и долговечность ямочного ремонта без существенного увеличения трудозатрат и стоимости работ. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку типовых решений для различных категорий дорог и климатических условий, а также на уточнение нормативных требований к геометрии ремонтных карт.

Список литературы

1 ТКП 059.1-2023 (33200). Автомобильные дороги. Правила устройства. – Введ. 01.01.2024. – Минск : БелдорНИИ, 2023. – 156 с.

2 **Ковалев, Я. Н.** Технология дорожного строительства : учеб. пособие / Я. Н. Ковалев, С. Е. Кравченко. – Минск : Новое знание, 2022. – 384 с.

3 **Бусел, А. В.** Влияние геометрии ремонтной карты на напряжённое состояние асфальтобетонного покрытия / А. В. Бусел // Автомобильные дороги и мосты. – 2023. – № 2. – С. 28–33.

4 Рекомендации по технологии ямочного ремонта асфальтобетонных покрытий с применением горячих смесей : утв. приказом БелдорНИИ 15.03.2022. – Минск, 2022. – 42 с.

5 СТБ 1291-2023. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию. – Введ. 01.07.2023. – Минск : Госстандарт, 2023. – 28 с.

УДК 656.212.4

УВЕЛИЧЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА ПОЛИГОНЕ БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Е. В. НИКИТИН
Белорусская железная дорога, г. Гомель
П. В. КОВТУН
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В современных экономических реалиях к качеству перевозочного процесса на всех видах транспорта, и в том числе на железной дороге, предъявляются новые, более высокие требования. На первый план выходят пожелания клиентов относительно сокращения времени нахождения в пути и комфортности поездки при безусловном соблюдении безопасности движения поездов.

Соответствие новому качеству перевозочного процесса вызывает резкое повышение требований к инфраструктуре железной дороги, направленное на увеличение пропускной способности станций и перегонов, а также повышение скоростей движения.

С целью систематизации и выявления корневых причин увеличения времени нахождения поездов в пути следования применён метод структурного анализа – диаграмма причинно-следственных связей. Данный инструмент позволяет категорировать и визуализировать потенциальные факторы, влияющие на проблему наличия «барьерных мест». В результате анализа построенных диаграмм на примере путевого развития направления Гомель – Калинковичи установлено, что доминирующими причинами являются технические ограничения отдельных объектов путевого хозяйства (прежде всего стрелочных переводов и рельсовых стыков), а также влияние человеческого фактора при организации движения и содержании инфраструктуры.

Существующее путевое развитие направления характеризуется наличием «барьерных мест», лимитирующих пропускную способность. Основными элементами, сдерживающими наращивание скоростного режима, являются одиночные обыкновенные стрелочные переводы (проекты 1740, 2433, 2768, 53103), эксплуатируемые в главных путях горловин станций; криволинейные участки; мосты (рисунок 1).



Рисунок 1 – Сочетание стрелочных переводов и криволинейных участков

На рассматриваемом участке выявлено двенадцать «барьерных мест»:

– наличие кривых участков пути – 4;

– искусственное сооружение – 1;

– стрелочные переводы в горловинах станций с движением поездов на боковой путь – 7.

Для ликвидации «барьерных мест» можно применить два принципиальных подхода к решению проблемы скоростных ограничений:

1 Стратегическое техническое перевооружение (долгосрочная перспектива). Наиболее перспективным техническим мероприятием является укладка стрелочных переводов пологой марки 1/18. Данный тип стрелочных переводов позволяет реализовать скорость движения по боковому направлению до 80 км/ч, что существенно снижает потери времени при отклонении поездов и повышает гибкость пропуска поездопотока. Обоснованность данного решения заключается в синергии с планами электрификации: замена стрелочных переводов должна производиться синхронно или до монтажа контактной сети, что минимизирует технологические «окна» и совокупную стоимость жизненного цикла инфраструктуры.

Следует подчеркнуть, что эффективность применения пологих марок стрелочных переводов в значительной степени определяется типом верхнего строения пути. В работах В. И. Матвецова убедительно обоснована целесообразность перехода на бесстыковой путь как необходимого условия повышения безопасности движения поездов, снижения металлоемкости верхнего строения пути и реализации высоких скоростей движения. Длинномерные сварные рельсовые плети исключают ударно-динамическое воздействие в зонах стыков, снижают сопротивление движению и эксплуатационные расходы на текущее содержание.

Применительно к направлению Гомель – Калинковичи укладка бесстыкового пути на главных путях в комплексе с переводом на марку 1/18 позволит не только достичь скорости 80 км/ч на боковых направлениях, но и обеспечить долговременную стабильность геометрии рельсовой колеи. Использование бесстыковых плетей особенно актуально для полигонов с перспективой роста грузонапряжённости и осевых нагрузок.

Также стоит брать во внимание, что технологический прогресс в части производства криволинейных крестовин дает новые возможности производителям стрелочной продукции возможность пересмотреть общую геометрию стрелочных переводов, увеличив радиусы стрелочных кривых при той же практической длине нетиповой конструкции. Эти возможности позволят разрабатывать стрелочные переводы нетиповых марок.

2 Оперативная оптимизация (краткосрочная перспектива, беззатратный метод). Анализ действующей нормативной базы [1–3] выявил несоответствие между конструкционными возможностями существующих стрелочных переводов и действующими скоростями. Так, конструкционная скорость (прямое направление) – 140 км/ч, конструкционная скорость (боковое направление) – 50 км/ч, а действующая (установленная) скорость – 40 км/ч. Выявлен резерв в 10 км/ч на боковом направлении.

Анализ подхода к нормированию скоростей на основе динамико-прочностных характеристик пути и подвижного состава позволяет пересмотреть ограничения. Устранение резерва в оценке состояния пути на станциях позволяет поднять скорость до 50 км/ч без капитальных вложений за счет лишь организационно-технических мероприятий [4].

Из анализа «барьерных мест» участка Гомель – Калинковичи видно, что для повышения скоростей движения необходим комплексный подход – разделение реализации на два этапа. Первый этап – пересмотр скоростей на существующих стрелочных переводах с повышения до конструктивных значений для получения быстрого экономического эффекта от ускорения оборота вагонов.

Второй этап – модернизация пути с укладкой стрелочных переводов марки 1/18, увеличение радиусов кривых участков железнодорожного пути, укладка бесстыкового пути. Чтобы избежать повторных закрытий перегонов и обеспечить комплексное повышение эксплуатационных характеристик, данные работы необходимо интегрировать с другими проектами.

Примененный принцип пересмотра скоростей (приведение действующих скоростей к конструкционным), переход на бесстыковой путь рекомендуется применять не только на указанном полигоне, но и повсеместно на всем полигоне Белорусской железной дороги, где осуществляется безостановочный пропуск поездов.

Список литературы

1 Об утверждении Правил технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь : постановление М-ва трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь от 25 нояб. 2015 г. № 25 // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL: pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21530414p (дата обращения: 09.09.2026).

2 Об установлении допускаемых скоростей движения поездов на Белорусской железной дороге : приказ Начальника Бел. ж. д. от 2 июля 2013 г. № 231Н. – Минск, 2013.

3 Об утверждении Норм допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) и 1435 мм на Белорусской железной дороге : приказ Начальника Бел. ж. д. от 29 сентября 2020 г. № 763НЗ. – Минск, 2020.

4 **Прокудин, И. В.** Организация переустройства железных дорог под скоростное движение поездов : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / И. В. Прокудин, И. А. Грачев, А. Ф. Колос ; под ред. И. В. Прокудина. – М. : Маршрут, 2005. – 716 с.

УДК 625.7/.8

КОНЦЕПЦИЯ СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЖИДКИХ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. В. ПЕТРУСЕВИЧ, В. В. ТОМАШОВ, Я. М. ГРИЩЕНКОВ, А. О. МИХАЛЬКОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В Республике Беларусь внедрение перспективных технологий для защиты асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог от разрушающих его воздействий различных факторов является важнейшим научным направлением.

Для данных целей авторами запатентован гидрофобный профилактический состав «Протект-01» [1], работы с которым осуществляются согласно ТУ BY 192670194.002-2019. Данный состав позволяет обеспечивать защитные свойства, заключающиеся в создании на поверхности асфальтобетона защитного слоя, препятствующего проникновению в его объем воды в осенний, зимний и весенний периоды эксплуатации (атмосферных осадков, снега, льда) и возможных переходов температуры окружающей среды через 0 ºС [2].

Предлагаемая технология профилактической обработки асфальтобетонного покрытия прошла производственную апробацию в соответствии с ТУ BY 192670194.002-2019 на следующих объектах:

– участке автомобильной дороги четвертой технической категории Н-4321 «Стрешин – Нижняя Олба», эксплуатируемой ДРСУ-149 КПРСУП «Гомельоблдорстрой», протяженностью 2000 м;

– участке подъездной автомобильной дороги к пограничной заставе «Дзержинск» Мозырского пограничного отряда Государственного пограничного комитета Республики Беларусь протяженностью 1850 м.

Проведенные практические исследования воздействия разработанного состава на объектах транспортной инфраструктуры Республики Беларусь показали, что процесс нанесения жидких дорожно-строительных материалов на поверхность асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги зависит от значительного количества различных факторов, основные из которых:

– состояние дорожного покрытия (наличие предыдущей обработки, степень загрязнения, дефектность);

– технические характеристики дорожного покрытия (шероховатость, тип и материал);

– технические средства и элементы организации движения (дорожная разметка, бортовые камни, разделительные брусья, парапеты и т. д.);

– регулирование технических характеристик распределительного устройства (скорость движения, давление в системе распределения) в зависимости от характеристик применяемого материала.

Разработанный способ управления распределением жидких дорожно-строительных материалов [3] предполагает два лазерных считывающих датчика *1*, установленных в передней части машины для распределения жидких дорожно-строительных материалов (далее – машина), два датчика контроля за выполнением работы *2*, расположенных в задней части машины, микропроцессорный блок обработки данных *3* и пульт управления *4*, установленные в кабине оператора машины, блоки управления форсунками распределения *5*, находящиеся на распределительном устройстве жидких дорожно-строительных материалов машины (рисунок 1).

а) *б*)

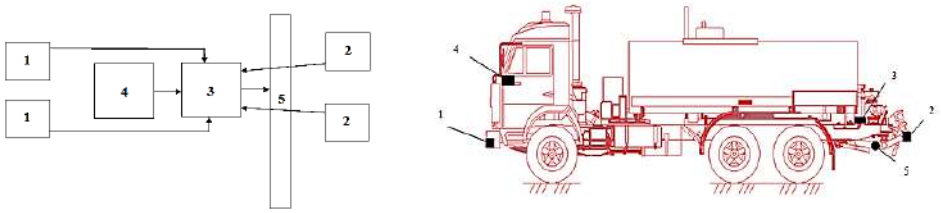


Рисунок 1 – Способ управления распределением жидких дорожно-строительных материалов:
а – принципиальная схема; *б* – конструктивная схема;
1 – лазерные считывающие датчики; *2* – датчики контроля выполнения работы; *3* – микропроцессорный блок обработки данных;
4 – пульт управления; *5* – блоки управления форсунками распределения

Данный способ управления распределением жидких дорожно-строительных материалов при нанесении их на поверхность асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги включает следующие этапы:

1 Два лазерных считывающих датчика, установленных в передней части машины для распределения жидких дорожно-строительных материалов (далее – машина), считывают информацию с поверхности дорожного покрытия по следующим параметрам: состояние дорожного покрытия (обработано покрытие или нет, степень загрязнения и наличия дефектности дорожного покрытия), технические характеристики дорожного покрытия (шероховатость дорожного покрытия, тип и материал дорожного покрытия), технические элементы автомобильных дорог (недопущение обработки дорожной разметки, контроль за бордюрными камнями и разделительными железобетонными парапетами на мостах и путепроводах), технические характеристики распределительного устройства (скорость устройства, давление в его системе распределения, работа системы распределения в зависимости от характеристик загруженного материала).

2 Информация лазерных считывающих датчиков поступает на микропроцессорный блок обработки данных *3*, в котором осуществляется проверка и корректировка процесса распределения жидкого дорожно-строительного материала за счет того, что в него перед началом работы загружена информация об участке дороги.

3 Микропроцессорный блок обработки данных *3*, систематизировав, подает информацию о параметрах распределения материала на пульт управления *4*, установленный в кабине машины и предназначенный для контроля и корректировки распределения жидких дорожно-строительных материалов оператором машины.

4 Систематизированная в микропроцессорном блоке обработки данных *3* и скорректированная на пульте управления *4* информация подается командой на блок управления форсунками распределения *5*, которые осуществляют распределение состава.

Отличительным признаком способа управления распределением жидких дорожно-строительных материалов является повышение точности их дозирования благодаря адаптации к указанным выше параметрам. При этом осуществляется заблаговременная загрузка в микропроцессорный блок информации о дорожном покрытии и появляется возможность в режиме реального времени посредством считывающих датчиков и блока обработки данных ее обрабатывать и систематизировать, подавать команду на блок управления форсунками распределения для нанесения жидкого дорожно-строительного материала на поверхность асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги.

В заключение стоит отметить, что реализация концепции способа управления распределением жидких дорожно-строительных материалов позволит повысить качество, снизить себестоимость производства дорожных работ за счет экономии распределяемого дорожно-строительного материала.

Список литературы

1 Патент BY 24097, МПК E01C 11/24 (2006.01). Гидрофобный состав для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог : № a 20180114 : заявлено 23.03.2018 : опубл. 30.10.2023 / Бочкарев Д. И., Петрусевич В. В. ; заявители Бочкарев Д. И., Петрусевич В. В. – 5 с.

2 **Петрусевич, В. В.** Исследование влияния состава гидрофобного профилактического «ПРОТЕКТ-01» на физико-механические свойства материалов асфальтобетонных покрытий / В. В. Петрусевич // Наука и техника. – 2023. – № 4. – С. 294–300.

3 Заявка № a 20260020, МПК E01C 19/26 (2006.01). Способ управления распределением жидких дорожно-строительных материалов : заявлено 05.02.2026 : опубл. 05.02.2026 / Петрусевич В. В., Кацубо П. А., Доломанюк Р. Ю. ; заявитель Белорусский государственный университет транспорта.

УДК 539.3

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ПЕСЧАНО-ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДОРОЖНОЙ ПЛИТКИ И ОБОРУДОВАНИЯ ПРИДОМОВЫХ ТЕРРИТОРИЙ

А. А. ПОДДУБНЫЙ, К. В. ЕФИМЧИК, А. А. АБРАМЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В развитии транспортного, промышленного и гражданского строительства в настоящее время важно усовершенствование характеристик новых и желательно возобновляемых материалов. Особое внимание уделяется полимерным композиционным материалам (ПКМ). Из таких материалов получают конструкции с особыми свойствами и высокими эксплуатационными характеристиками. При получении изделий из ПКМ нужно учитывать их будущие высокие прочностные свойства, с одной стороны, а также специфику и экологическую безопасность их переработки – с другой. Перед научным сообществом стоит задача не только разработки экономически выгодного и экологически безопасного материала, но и поиска сфер его применения. В настоящее время в Белорусском государственном университете транспорта разработан композиционный песчано-полимерный материал конструкционного назначения, характеристики которого позволяют применять его в изготовлении изделий для быстровозводимых конструкций [1]. Разработанный материал подходит для изготовления сборно-разборного дорожного настила (СРДН), устанавливаемого на любую поверхность и собираемого с помощью замков в любую конфигурацию без использования специальной грузоподъёмной техники [2]. Настил СРДН может быть изготовлен любой конфигурации, его можно использовать при оборудовании придомовых территорий, укладывать не только на ровную колею, но и на места разъезда техники, площадки для хранения техники, выполнять при его помощи плавные повороты, укладывать пешеходные дорожки, а также настилы для оборудования строительных площадок и т. д. Преимущество разработанного ПКМ – это его недорогая стоимость, применение вторсырья и переработка с дальнейшим использованием.

Из разработанного песчано-полимерного материала возможно изготовление различного рода элементов, как временных, так и постоянных дорожно-мостовых конструкций, обваловок, сборно-разборных зданий (сооружений), тротуарных дорожек, плит для хранения техники на открытых площадках, лестничных пролётов, стеновых панелей, как замена бетонных плит, используемых в строительстве для укрепления русел, конусов и откосов насыпей малых и средних мостов и водопроводных путепроводов. Особое внимание необходимо обратить на использование дорожной плитки из песчано-полимерного материала при оборудования придомовых территорий.

Свойства и характеристики изделий зависят от типа конструкции, наличия армирующих элементов, её габаритных размеров, а главное – от соблюдения технологии производства.

Одно из главных преимуществ разработанного материала – неподверженность коррозии и отсутствие необходимости в армировании. Армирование необходимо только при изготовлении технологических замков или зацепов. Сталь является материалом, который подвержен разрушению под воздействием влаги. Однако в сочетании эти два элемента еще больше повышают прочность материала и защищают сталь от образования ржавчины и коррозии.

Полученный материал не имеет ограничений в обработке, его можно сверлить, пилить, смачивать, склеивать, фрезеровать, красить.

Исходя из результатов ранее проведенных испытаний можно сделать вывод о преимуществах физико-механических свойств разработанного материала над бетоном.

Результаты проведения испытаний данного материала и бетона класса В35 марки М450 приведены в таблице 1 (испытанию подвергались образцы размером 40×40×160 мм).

При приведении изделия в негодное состояние оно может быть вторично переработано в аналогичное. Для переработки негодных изделий (бракованных) дополнительно необходим шредер (дробилка).

Таблица 1 – **Результаты проведения испытаний материалов**

Показатель, единица измерения	Разработанный материал	Бетон класса В35 марки М450
Объемная плотность, г/см^3	1,74	2,3
Предельная прочность при изгибе, Н/мм^2	21,93	3
Прочность сжатия, Н/мм^2	42,90	40
Предел прочности при растяжении, Н/мм^2	5,70	2,5
Статический Е-модуль (сжатие), Н/мм^2	4890	35000
Статический Е-модуль (изгиб), Н/мм^2	938	–
Е-модуль динамический, Н/мм^2	9980	45000
Низкотемпературный предел прочности при изгибе, Н/мм^2	29,87	–
Низкотемпературный предел прочности при сжатии, Н/мм^2	43,11	–
Водопоглощение, %	0,27	5,7
Открытая пористость, %	0,49	10
Износ при шлифовке, 1000 мм^3/ 5000мм^2	6,7	17,5
Глубина водопроницаемости, мм	0,33	47,7
Теплопроводность, Вт/мК	0,303	1,2

С октября 2019 года по настоящее время проходят испытания образцы шестигранных плиток, которые были уложены на учебно-полевом центре БелГУТа в качестве дорожных настилов для проезда техники (рисунок 1).

Плитка из разработанного материала не деформируется при проезде загруженного автомобиля общей массой 9,5 тонн [3].

При условии изменении температуры от +20 ºС до – 20 ºС материал за семь лет зарекомендовали себя с положительной стороны, он не деформировался.



Рисунок 1 – Наезд автомобиля МАЗ-4371 на шестигранную плитку на полигоне БелГУТа

Таким образом, можно сделать вывод, что преимущества песчано-полимерных плит заключаются в следующем:

– небольшой массе, обеспечивающей удобный монтаж (в 1,35 раз легче бетона), следовательно и в уменьшении затрат на транспортировку;

– высокой прочности и пластичности (материал не раскалывается, не деформируется);

– износоустойчивости;

– невысоком водопоглощении и устойчивости к минусовым температурам;

– невысокой теплопроводности;

– противоскользящих характеристиках;

– маслостойкости и устойчивости к кислотным средам;

– ремонтопригодности и полной переработке;

– возможности изготовления различных размеров и цветов.

– долговечности (30–50 лет).

Список литературы

1 Патент BY 24427. Композиционный песчано-полимерный материал конструкционного назначения : № a 20220175 : заявлено 30.06.2022 : опубл. 01.11.2024 / К. В. Ефимчик, А. А. Поддубный, Е. Ф. Кудина, Р. Ю. Доломанюк ; заявитель и патентообладатель Белорусский государственный университет транспорта.

2 Сборно-разборный дорожный настил : № a20230136 : заявлено 30.06.2022 / К. В. Ефимчик, Е. Ф. Кудина, А. А. Поддубный ; заявитель и патентообладатель Белорусский государственный университет транспорта.

3 **Поддубный, А. А.** Изготовление элементов дорожных настилов из композиционных материалов на основе полиолефинов и нефтешламов / А. А. Поддубный, О. А. Ермолович, К. В. Ефимчик // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 1 (40). – С. 62–63.

УДК 539.3

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ И РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А. А. ПОДДУБНЫЙ, М. Ю. НИКИТЕНКО, П. А. ПОДДУБНЫЙ, К. В. ЧИКЕЗОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Обзор существующих решений в Республике Беларусь

В Республике Беларусь вопросами непрерывного контроля мостовых сооружений занимается отраслевая мостовая лаборатория «БелдорНИИ». Автоматизированная система мониторинга состоит из комплекта датчиков контроля, установленных на конструктивных элементах мостовых сооружений, данные с которых посредством GSM-сигнала передаются на сервер организации, которая ведет контроль. Вся аппаратная часть систем мониторинга изготовлена в Республике Беларусь (рисунок 1).



Рисунок 1 – Датчик контроля системы мониторинга

В настоящее время в стране действуют два центра мониторинга. Первый, созданный на базе ГП «Горавтомост», занимается эксплуатацией мостов и путепроводов Минска. Второй, под управлением РУП «Белдорсвязь», следит за состоянием мостов на республиканских автодорогах.

Разработанная система предназначена для контроля состояния сооружений и прогнозирования длительных деградационных процессов в их конструкциях. На экране компьютера специалист видит микроперемещения элементов сооружения относительно исходной отметки, а при превышении допустимых значений система подает сигнал тревоги.

Автоматизированная система мониторинга (АСМ) представляет собой совокупность технических средств для сбора информации от первичных датчиков контроля, передачи сигналов через блоки сбора данных в центральный модуль данных системы с дальнейшей отправкой сигналов по 628 каналам мобильной и интернет-связи на внешний интернет-сервер с установленным программным обеспечением [6]. Основные функции АСМ мостов включают: фиксацию деформаций несущих конструкций, вибраций, динамических нагрузок и наклонов/осадок фундаментов; измерение температуры, влажности, скорости ветра и других погодных факторов, влияющих на объект; обнаружение опасных отклонений от нормы, которые могут привести к разрушению; мгновенное информирование ответственных служб о критических изменениях; обработку полученной информации для оценки остаточного ресурса сооружения. Внедрение автоматизированных систем мониторинга значительно улучшило состояние мостов, переведя обслуживание с «календарного» метода на управление по фактическому состоянию. В режиме 24/7 датчики фиксируют микроперемещения, предотвращая аварии и оптимизируя бюджеты за счёт получения объективной цифровой истории изменений [6].

Для дополнительного наблюдения за мостами и путепроводами с дефектами, требующими капитального ремонта или реконструкции, БелдорНИИ создал мобильные комплексы автоматизиро-

ванного мониторинга. В отличие от стационарных, эти системы беспроводные, быстро монтируются и не нуждаются в постоянном источнике питания.

Стоимость установки стационарных систем мониторинга составляет небольшую часть от общей стоимости строительных работ. В Республике Беларусь их только начинают внедрять на мосты и путепроводы. Мобильные комплексы используются при обследовании мостов для получения точных данных о деформациях конструкций и внутренних усилиях.

Однако данные таких систем не показывают, как дефекты влияют на работу всего моста и его отдельных элементов в реальном времени. Для непрерывного контроля состояния мостов необходимы системы постоянного мониторинга, которые отслеживают условия эксплуатации и поведение конструкций, обеспечивая их функциональность в заданных пределах.

Обзор существующих решений в Российской Федерации

Программный комплекс «СМИС Эксперт» (ПТК СМИК) представляет собой одно из наиболее востребованных решений в России для мониторинга и оценки технического состояния мостов, железнодорожных и автодорожных сооружений, а также других объектов инфраструктуры. Разработанный с учетом строгих российских нормативных требований, этот комплекс обеспечивает непрерывный контроль состояния конструкций, позволяя своевременно выявлять дефекты, прогнозировать остаточный ресурс и предотвращать аварийные ситуации. Его универсальность, модульная структура и высокая точность измерений сделали СМИС Эксперт лидером на рынке систем мониторинга в России.

Основное назначение ПТК СМИК заключается в сборе, обработке и анализе данных, поступающих от различных датчиков, установленных на контролируемых объектах. Комплекс включает тензодатчики для измерения напряжений, инклинометры для контроля углов наклона, вибродатчики для оценки динамических характеристик, а также преобразователи акустической эмиссии для выявления микротрещин и других дефектов. Эти датчики интегрируются в единую систему, которая в реальном времени передает данные на сервер для дальнейшей обработки. Важной особенностью СМИС Эксперт является автокалибровка датчиков, что обеспечивает высокую точность измерений даже в условиях длительной эксплуатации. Схема комплекса представлена на рисунке 2.

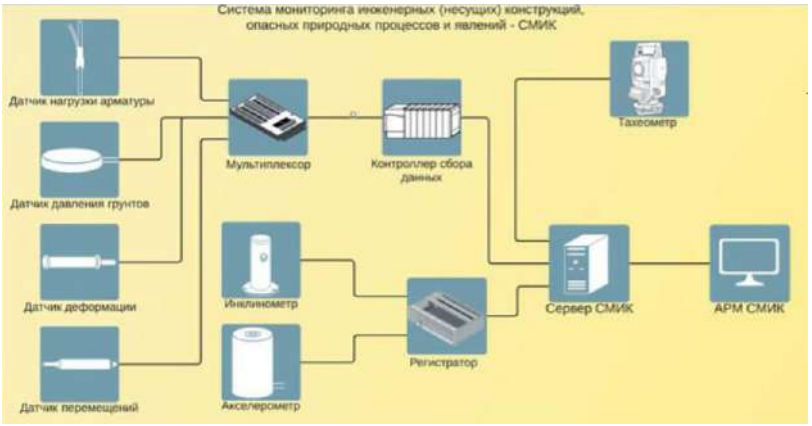


Рисунок 2 – Схема мониторинга инженерных конструкций: интеграция датчиков, мультиплексора, контроллера сбора данных, инклинометра, регистратора, тахеометра, сервера и АРМ СМИС для непрерывного контроля состояния объекта

Функционал комплекса охватывает широкий спектр задач. Он позволяет проводить оценку напряженно-деформированного состояния конструкций, выявлять критические зоны, подверженные повышенным нагрузкам, и прогнозировать поведение моста при различных сценариях эксплуатации. Программное обеспечение комплекса включает клиент-серверное и диспетчерское ПО, которое визуализирует данные в удобной форме, например, по принципу «светофора», где зеленый цвет обозначает нормальное состояние, желтый – необходимость внимания, а красный – критические отклонения. Система также поддерживает оповещения (SMS, звуковые сигналы) при превышении допустимых параметров, что позволяет оперативно реагировать на потенциальные угрозы. Кроме того, СМИС Эксперт формирует базы данных для долгосрочного анализа, что помогает планировать ремонтно-восстановительные работы и оптимизировать расходы на эксплуатацию. Программное обеспечение комплекса представлено на рисунках 3 и 4.

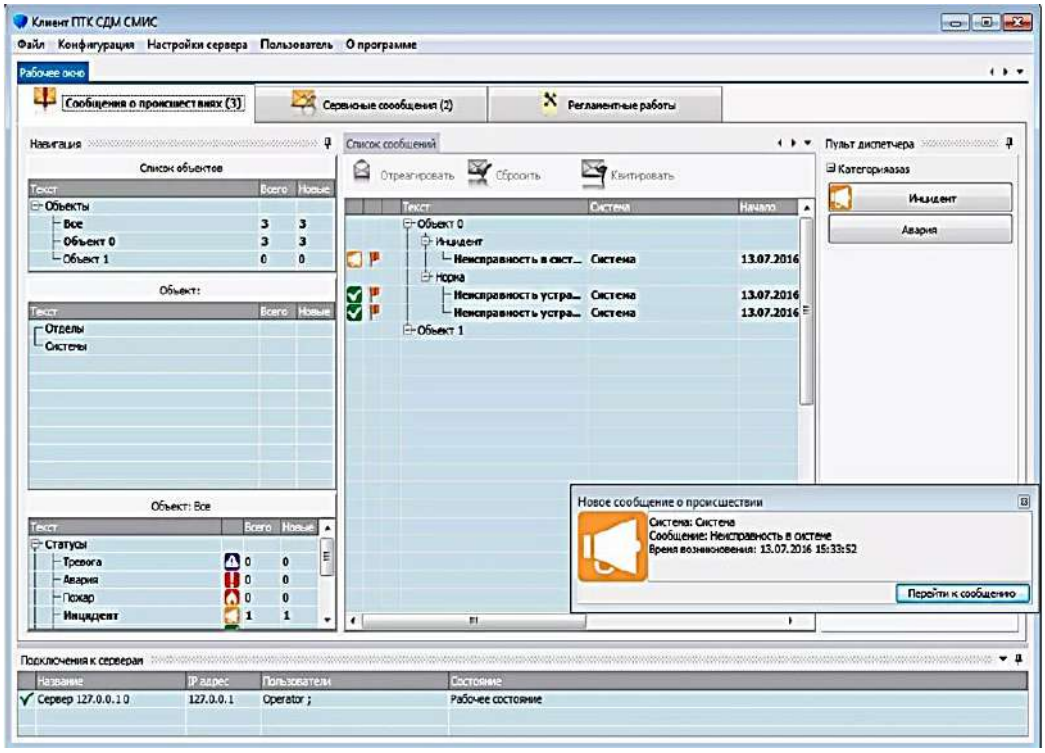


Рисунок 3 – Интерфейс клиентского ПТК СМИС Эксперт: отображение состояния объектов мониторинга с уведомлениями о происшествиях, списком объектов и их статусов

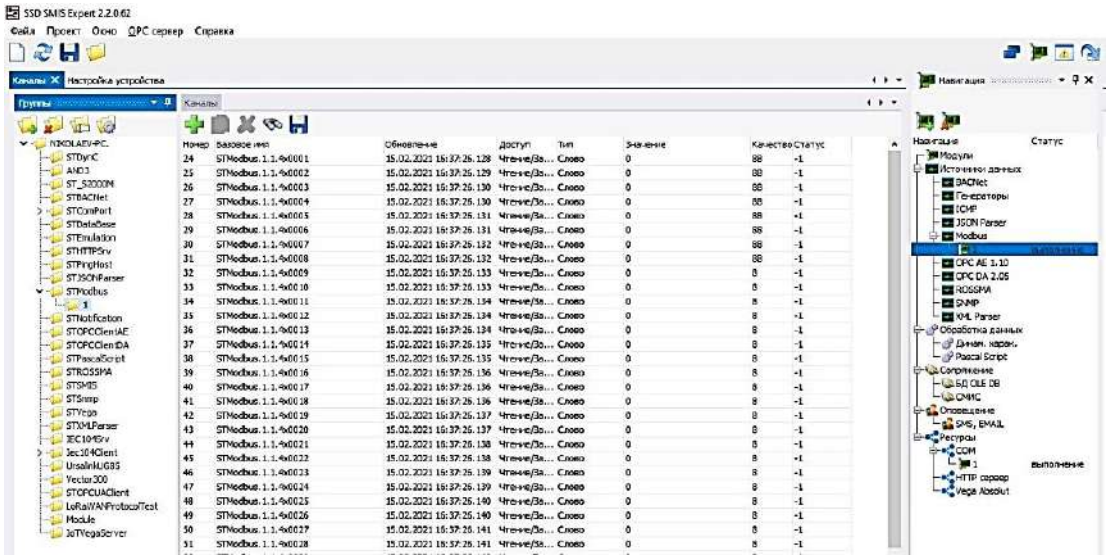


Рисунок 4 – Отображение данных мониторинга с каналами измерений, включая параметры STModbus (температура, состояние), статусы устройств и статистику выполнения (успешно/неуспешно)

Одним из ключевых преимуществ ПТК СМИК является его модульная архитектура. Это позволяет адаптировать систему под конкретные объекты, добавляя новые датчики или интегрируя ее с геодезическим оборудованием, таким как GPS/GLONASS-приемники или автоматизированные тахеометры. Такая гибкость делает комплекс подходящим как для типовых мостов, так и для уникальных сооружений с повышенными требованиями к безопасности. Например, СМИС Эксперт успешно применяется на объектах ОАО «Российские железные дороги», включая железнодорожные мосты, а также в проектах, связанных с автодорожной и гидротехнической инфраструктурой, таких как сухие доки судостроительного комплекса «Звезда». Пример визуализации газопровода представлен на рисунке 5. Пример расположения датчиков моста представлен на рисунке 6.

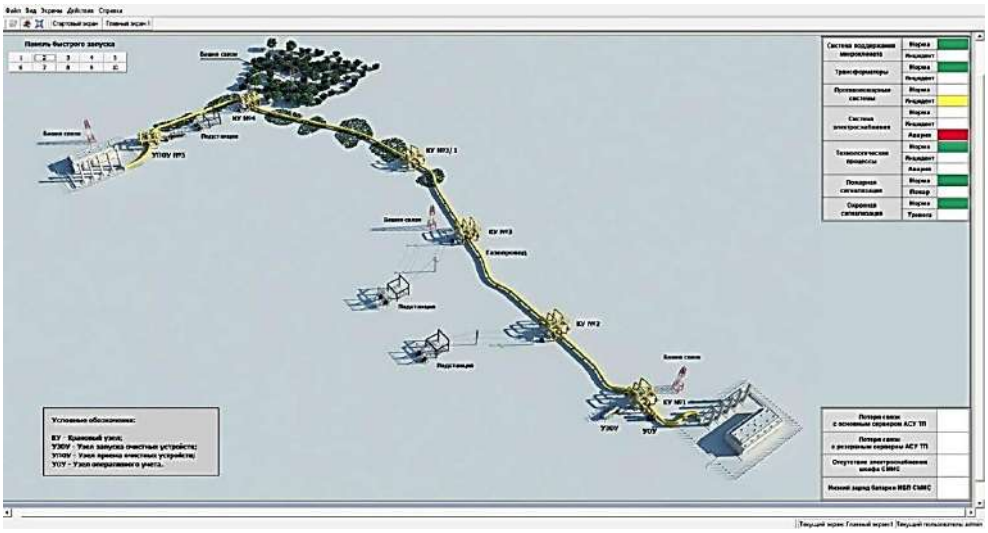


Рисунок 5 – Визуализация объекта мониторинга: схема газопровода с обозначением узлов (КУ) и участков (УНО, УПУ), цветовая индикация состояния систем (норма, авария, предупреждение), а также отображение подключения к серверу АСУ ТП и СМИС



Рисунок 6 – Мониторинг вантового моста с помощью СМИС Эксперт: визуализация состояния конструкции с датчиками (инклинометры, акселерометры, датчики давления) и системой оповещений (норма, инцидент, авария) для оперативной обработки, хранения данных и телеграфного оповещения

СМИС Эксперт полностью соответствует российским нормативным документам, включая СП 274.1325800.2016 «Мосты. Мониторинг технического состояния» и ГОСТ Р 54523-2011, что обеспечивает его легитимность при использовании в государственных и коммерческих проектах. Комплекс поддерживает интеграцию с методами неразрушающего контроля, такими как ультразвуковая диагностика и акустическая эмиссия, а также с аналитическими инструментами, включая метод конечных элементов (МКЭ), что позволяет проводить комплексную оценку состояния конструкций. Это особенно важно для мостов, подверженных неравномерным осадкам, коррозии или интенсивным динамическим нагрузкам.

В состав продукта входит: серверная часть, для установки которой требуется SQL server; клиентская часть, размещаемая на АРМ СМИС (оперативный мониторинг); коробка; дистрибутив на USB-носителе; USB-ключ защиты; руководства на ПО; брелок; лицензия.

Применение СМИС Эксперт способствует значительному повышению безопасности инфраструктурных объектов. Непрерывный мониторинг позволяет выявлять дефекты на ранних стадиях, предотвращая развитие аварийных ситуаций. Кроме того, система помогает оптимизировать затраты на эксплуатацию за счет точного планирования ремонтных работ на основе данных о фактическом состоянии конструкций. Однако внедрение комплекса требует значительных первоначальных инвестиций, включая установку датчиков и настройку программного обеспечения, а также регулярного обслуживания для поддержания точности измерений [1].

Сегодня назрела необходимость создания в Республике Беларусь собственной системы мониторинга состояния мостовых сооружений. Её уникальность должна обеспечиваться внедрением отечественных методик описания динамических процессов в несущих конструкциях [2–5]. Такой подход позволит учитывать реальные условия эксплуатации, характерные для белорусских мостов, и повысить достоверность прогнозирования их остаточного ресурса.

Не менее важной задачей является подготовка специалистов в БелГУТе по проектированию, строительству и эксплуатации транспортных сооружений, включая перспективные высокоскоростные магистрали, а также по разработке собственных приборов диагностики и программных комплексов, таких как «SOFIT-MOST». Это обеспечит технологическую независимость страны в области мониторинга инфраструктуры и позволит вывести безопасность мостовых сооружений на качественно новый уровень.

Список литературы

1 Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 2. Непрерывный мониторинг состояния мостовых сооружений / И. Г. Овчинников, И. И. Овчинников, О. И. Нигаматова, Е. С. Михалдыкин // Транспортные сооружения. – 2014. – Т. 1, № 2. – URL: http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf (дата обращения: 28.09.2026). – DOI: 10.15862/01TS214.

2 **Poddubny, A. A.** Dynamic loading of the rod at a sudden change of elastic foundation structure / A. A. Poddubny, V. B. Gordon // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2021. – Vol. 1079, is. 4. – P. 042076.

3 **Поддубный, А. А.** Динамические догружения стержня при внезапном изменении структуры упругого основания / А. А. Поддубный, В. А. Гордон, Т. В. Потураева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2021. – № 2 (346). – С. 27–41.

4 **Поддубный, А. А.** Динамика конструктивно нелинейной системы «балка – основание» при внезапном образовании трещин» / А. А. Поддубный, В. А. Гордон // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022 – № 1 (44) – С. 84–87.

5 Added stress of a cantilever under sudden alterations in its foundation / A. Poddubny, V. Gordon, N. Bakaeva, P. Morev // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2497. – P. 040002.

6 **Чикезов, К. В.** Автоматизированный мониторинг мостов в Беларуси / К. В. Чикезов // Наука – транспортной инфраструктуре : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, студентов и учащихся колледжей, Гомель, 20 марта 2026 г. / Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель, 2026. – С. 132–133.

УДК 625.7

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРАСС В ЗОНАХ МАССИВНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ

Н. И. РЕМЕЗ
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Дорожно-транспортные происшествия с участием тяжеловесного транзитного транспорта на скоростных магистралях регулярно обнажают системный кризис в сфере проектирования и содержания элементов пассивной безопасности. Когда 40-тонный автопоезд на эксплуатационной скорости 80–90 км/ч совершает наезд на массивное препятствие, такое как центральная или боковая опора путепровода, – последствия почти всегда носят катастрофический характер. Подобные трагедии не только мгновенно уносят человеческие жизни, но и парализуют важнейшие логистические артерии, а также наносят колоссальный материальный ущерб государству из-за угрозы обрушения пролетных строений искусственных сооружений.

В современной судебно-экспертной и юридической практике по экономическим спорам зачастую доминирует формальная логика: если техническое средство организации дорожного движения находилось на момент дорожно-транспортного происшествия в исправном эксплуатационном состоянии и соответствовало утвержденной ранее проектной документации, дорожная инфраструктура признается надлежащей. Вся полнота материальной и правовой ответственности за разрушение опоры путепровода в таких случаях перекладывается на владельца источника повышенной опасности (перевозчика). Однако детальный инженерно-технический анализ показывает, что барьерные ограждения в виде деформируемых металлических дорожных ограждений в створах массивных препятствий, установленные ранее при первой сдаче объектов в эксплуатацию, зачастую физически не способны выполнить защитную функцию при контакте со сверхтяжелым транспортом ввиду не соответствия удерживающей способности реальным ударным воздействиям.

«Устаревшие» конструкции ограждений в местах опор путепроводов сталкиваются с рядом неоспоримых факторов при эксплуатации на магистральных участках автомобильных дорог.

Геометрическое несоответствие существующих конструкций по высоте зачастую вызывает эффект «трамплина» для наезжающего транспорта. Высота однорядного дорожного ограждения должна составлять 0,75–0,85 м, в то время как центр тяжести груженого полуприцепа автопоезда находится на уровне 1,5–2,0 м, а верхняя точка управляемого колеса тягача – около 1,1 м. При остроугольном или фронтальном направлении соударения переднее колесо автопоезда, как правило, наезжает на продольную барьерную W-образную балку, сминает её, превращая ограждение в наклонный пандус, направляющий многотонную машину вверх и провоцирующий ее опрокидывание.

Следующей распространенной проблемой является эффект кинематического среза стоек, когда при недостаточном шаге стоек (2,0–4,0 м) массивный бампер и жесткие элементы рамы автопоезда последовательно «сбривают» дорожные стойки ограждения в точке непосредственного контакта. Барьерное ограждение работает эффективно только как неразрезная целостная система, распределяющая энергию удара по продольной балке W-образного профиля. В случае недостаточной степени удержания всей конструкции при наезде тяжеловесного транспорта продольная металлическая балка мгновенно теряет натяжение, провисает и «ложится» на землю, не препятствуя транспортному средству продолжать движение по инерции.

Величина реального динамический прогиба для установленной конструкции в зонах массивных препятствий также играет ключевую роль: в тех случаях, когда конструкция ограждения выдерживает разрывное усилие без потери целостности, существующее ограждение может обладать значительной рабочей шириной деформации (от 1,5 до 3,0 м). Если оказывается, что опора путепровода расположена в непосредственной близости (например, в 1,0 м от лицевой грани ограждения), то такая конструкция не сможет защитить автомобиль от соударения с массивным препятствием.

В мировой практике оценки эффективности удерживающих устройств принято руководствоваться исключительно результатами натурных испытаний конструкций: так, в Европейском Союзе в соответствии с EN 1317 [1], в США в соответствии с AASHTO M180, а также стандартами AS/NZS в Австралии и Новой Зеландии.

В соответствии со стандартами EN 1317, которые действуют в том числе и на территории Республики Беларусь (как СТБ EN 1317), существуют три уровня удерживающей способности: нормальный уровень (N1, N2) – для легковых автомобилей на обычных дорогах; повышенный уровень (H1, H2, H3) – для грузовых автомобилей и автобусов, а также высокий уровень (H4a, H4b) – для тяжелых грузовых автомобилей в особо опасных местах (на дорожных сооружениях, крутых спусках). В дополнение к необходимой удерживающей способности оцениваются и показатели безопасности людей, находящихся в транспортном средстве в момент соударения с ограждающей конструкцией: индекс травмирования или индекс ускорения при ударе (Acceleration Severity Index (ASI) и THIV (Theoretical Head Impact Velocity) – теоретическая скорость удара головы не пристегнутого человека об элементы внутренней конструкции автомобиля [2].

Однако сопоставление нормативной базы показывает, что формально на бумаге действующие государственные стандарты содержат высокие классы удерживающей способности (до У8–У9 с в соответствии с СТБ 1300-2024), сопоставимые с европейскими требованиями, но в реальности практическое применение этих норм ограничивается системной законодательной лазейкой, зафиксированной в правилах применения технических средств организации дорожного движения [3].

Ключевая проблема кроется в нормативных допущениях (в частности, закрепленных в СТБ 1300-2024), которые официально разрешают не производить замену дорожного ограждения на требуемое по степени удержания для текущей интенсивности движения, если конкретный участок трассы не находится в состоянии юридической «реконструкции».

Игнорирование динамики изменения состава и интенсивности движения приводит к тому, что участки автомобильных дорог юридически не меняют свой класс и категорию дороги, геометрический профиль и параметры пассивной безопасности искусственно «консервируются», несмотря на кратно увеличившуюся долю тяжелого коммерческого транспорта в общем потоке.

Пересмотр нормативных документов в сторону их реальной инженерной эффективности станет возможен только тогда, когда ценность человеческой жизни будет принята в качестве главного критерия оценки функционирования всей дорожно-транспортной отрасли. Настоящий независимый аудит безопасности дорожного движения обязан сместить фокус с поверхностного юридического поиска виновного лица («водитель уснул или превысил скорость») на глубокий системно-

инженерный анализ («почему дорожная инфраструктура не сработала как щит и не спасла жизнь»). Только создание по-настоящему «прощающей» дорожной инфраструктуры позволит гарантировать, что секундная оплошность или физическое переутомление человека за рулем не превратятся в масштабную трагедию.

Список литературы

1 **Шишко, Н. И.** Теоретические предпосылки оценки эффективности работы удерживающих устройств на автомобильных дорогах общего пользования / Н. И. Шишко, В. И. Адашкевич // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 98–105.

2 Road restraint systems. Part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers and vehicle parapets : EN 1317-2:2010. – Introduced 01.07.2010. – Brussels : European Committee for Standardization, 2010. – 34 p. – (European Standard).

3 Технические средства организации дорожного движения. Правила применения : СТБ 1300-2024. – Взамен СТБ 1300-2014 ; введ. 01.04.2025. – Минск : Госстандарт : БелГИСС, 2025. – 124 с.

УДК 625.144.5:674.028.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СОСТАВНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ШПАЛ

В. В. РОМАНЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Одной из актуальных задач транспортной и деревообрабатывающей отраслей является повышение эффективности использования лесосырьевых ресурсов при производстве шпалопродукции для железнодорожных путей. Белорусская железная дорога эксплуатирует около 1,7 тыс. км путей на деревянном подрельсовом основании, при этом доля деревянных шпал на станционных путях и путях необщего пользования составляет соответственно 31,3 и 54,5 %.

Основным производителем шпалопродукции в Республике Беларусь является ОАО «Борисовский шпалопропиточный завод» (БШПЗ), где при изготовлении переводных брусьев длиной от 3,0 до 5,5 м из пиловочного бревна длиной 5,5–6,0 м образуются невостребованные обрезки брусьев длиной от 0,25 до 2,50 м, которые не пригодны для производства стандартных шпал (длина 2,75 м). Ежегодный их объем емеет системный характер и создает устойчивый резерв сырья для изготовления составных деревянных шпал (СДШ). Вовлечение таких обрезков в хозяйственный оборот позволит снизить расход деловой древесины, сократить площадь вырубок леса и уменьшить нагрузку на полигоны утилизации отходов, что соответствует приоритетам устойчивого лесопользования и «зеленой» экономики.

СДШ представляет собой конструкцию, состоящую из трех продольно соединенных элементов, изготовленных из короткомерных обрезков переводных и мостовых брусьев. Соединение элементов выполняется бесклеевым, механическим замком типа «шип-паз» («ласточкин хвост»), располагаемым вне подрельсовой зоны [1]. Такое соединение препятствует разъединению частей и не требует применения крепежных деталей (болтов, нагелей, хомутов), клеевых составов или защитных оболочек (рисунок 1).

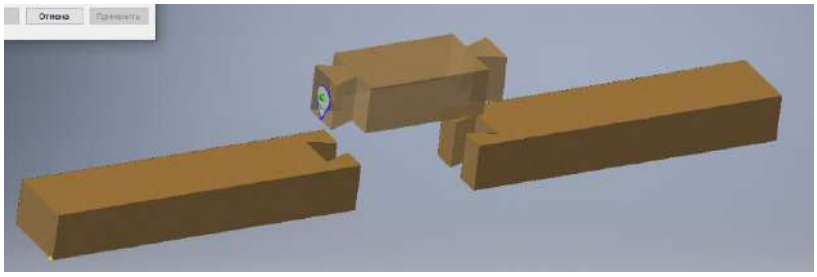


Рисунок 1 – Трехмерная модель составной деревянной шпалы

Исследования показали, что применение обрезков переводных и мостовых брусьев как в исходных, так и в обрезных до стандартных размеров обеспечивает достаточную несущую способность балластного слоя и земляного полотна для большинства видов материалов. Надежность земляного полотна гарантируется при толщине балластной призмы не менее 0,3 м, а дополнительная механическая обработка обрезков с позиции прочности не обязательна.

В зависимости от установленного уровня скорости движения поездов и грузонапряженности железнодорожные пути делятся на пять классов [2]. Согласно системе ведения путевого хозяйства для содержания путей 1–4 классов организация ремонта верхнего строения пути предусматривает использование только железобетонных шпал. Таким образом, область применения деревянных шпал, включая составные, объективно ограничивается условиями эксплуатации, где динамические воздействия подвижного состава на верхнее строение пути минимальны.

К таким условиям относятся некоторые категории станционных путей и пути необщего пользования, на которых отсутствует пассажирское движение поездов, а скорости грузовых составов не превышают 15 км/ч. Требования к условиям содержания таких путей, в целом, и шпал, в частности, значительно ниже, чем к путям 1–4 классов.

Дополнительным обоснованием возможности применения СДШ на указанных путях служат нормы содержания верхнего строения пути. Верхнее строение железнодорожного пути представляет собой не совокупность отдельных, независимо работающих опор, а сложную пространственную многоэлементную систему, включающую рельсы, промежуточные скрепления, шпалы, балластный слой и земляное полотно. Благодаря тому, что рельсовые нити связывают большое количество однотипных шпал в единую конструкцию, внешняя нагрузка от колесной пары не воспринимается каждой шпалой изолированно. Рельс в этом случае работает как балка на упругом основании и вовлекает в восприятие усилия несколько смежных опор, что приводит к перераспределению нагрузки между соседними шпалами, скреплениями и балластом. Поэтому локальное ослабление, частичная потеря надежности или даже полный выход из строя одной либо нескольких подряд лежащих шпал не означают немедленного отказа всей системы. Именно это свойство «живучести» системы позволяет допускать на малодеятельных путях и путях необщего пользования при ограничении скоростей грузовых составов до 15 км/ч наличие «кустов» негодных шпал в установленных нормами содержания пределах, что подтверждается нормами содержания:

– при скоростях до 25 км/ч на километр допускается до 50 % негодных шпал;

– при скоростях до 15 км/ч для прямых участков и кривых радиусом 650 м и более – «кусты» из шести лежащих подряд негодных шпал;

– при скоростях до 15 км/ч для кривых радиусом менее 650 м – «кусты» из четырех лежащих подряд негодных шпал.

Исходя из этого, областью применения СДШ обоснованно определены прямые участки путей необщего пользования с установленными ограничениями скоростей грузовых составов до 15 км/ч. На таких участках СДШ могут укладываться как смешанно с цельнобрусковыми шпалами, так и для разрядки «кустов» негодных шпал – замены нескольких последовательно расположенных дефектных шпал без риска потери несущей способности рельсовой колеи.

Следует отметить, что проведенные исследования напряженно-деформированного состояния СДШ подтвердили значительный запас прочности конструкции [3]. Предельная боковая нагрузка для СДШ установлена равной 60 кН, что в 4 раза превышает расчетную нагрузку 15 кН для малодеятельных путей и путей необщего пользования. Максимальные компонентные напряжения не превышают 0,87 МПа, касательные – 0,41 МПа, главные растягивающие – до 7,2 МПа, что значительно ниже допускаемых значений для древесины сосны. Экспериментальные исследования натурных образцов при имитации горизонтального бокового воздействия до 30 кН показали, что максимальное уширение рельсовой колеи не превысило 8 мм (ширина колеи 1528 мм), что находится в пределах допускаемых значений для путей необщего пользования.

Эколого-экономическая эффективность применения СДШ в определенной области также подтверждается расчетами. Потенциальный годовой выпуск СДШ на БШПЗ оценивается до 10179 шт., что обеспечивает экономию около 1221 м^3 деловой древесины и сохранение до 8 га сосновых лесов ежегодно. Предотвращается образование отходов в объеме около 1200 м^3/год, снижается нагрузка на полигоны и уменьшаются выбросы парниковых газов. Разработанная конструкция соответствует принципам ресурсосбережения и «зеленой» экономики, поскольку не требует синтетических клеев, металлических креплений или защитных оболочек.

Таким образом, на основании анализа классификации железнодорожных путей, норм их содержания и результатов комплексных исследований (математического моделирования, имитационного моделирования методом конечных элементов, экспериментальных испытаний) определена рациональная область применения составных деревянных шпал. СДШ рекомендуются к применению на малодеятельных станционных путях и путях необщего пользования на прямых участках с ограничением скорости грузовых поездов до 15 км/ч, как при смешанной укладке с цельнобрусковыми шпалами, так и для разрядки «кустов» негодных шпал. Применение СДШ в указанной области обеспечивает безопасность движения, ресурсосбережение и экологический эффект.

Список литературы

1 **Романенко, В. В.** Ресурсосберегающая технология изготовления составных деревянных шпал / В. В. Романенко, А. Б. Невзорова // Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2023. – № 2 (270). – С. 143–151.

2 Положение о системе ведения путевого хозяйства : СТП БЧ 56.388-2022 : утв. приказом зам. Нач. Бел. ж. д. от 14.05.2022 № 370 НЗ. – Введ. 22.06.2022. – Минск : Бел. ж. д., 2022. – 35 с.

3 **Невзорова, А. Б.** Имитационное моделирование несущей способности составной деревянной шпалы с учетом поездной нагрузки / А. Б. Невзорова, В. В. Романенко // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 72–81.

УДК 625.144.5:674.028.4

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

В. В. РОМАНЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Статистический анализ представляет собой совокупность методов сбора, обработки, систематизации, анализа и интерпретации данных, направленных на выявление закономерностей, оценку вероятностных характеристик и проверку статистических гипотез. В контексте математического моделирования статистический анализ позволяет оценить достоверность и значимость полученных результатов, выявить влияние отдельных факторов и их взаимодействий, а также построить прогнозные модели.

В настоящее время развитие методов математического моделирования в механике деформируемого твёрдого тела неразрывно связано с необходимостью обработки больших массивов расчётных данных. Особенно это актуально для конструкций из анизотропных материалов, таких как древесина, где природная вариабельность свойств и множество влияющих факторов требуют применения вероятностно-статистических подходов. В настоящей работе рассматривается опыт применения статистического анализа для обоснования параметров узловых соединений составных деревянных шпал, что позволяет повысить достоверность и практическую значимость результатов вычислительного эксперимента.

Современные задачи проектирования и оценки несущей способности элементов верхнего строения железнодорожного пути характеризуются многофакторностью, нелинейностью и значительной вариабельностью свойств материалов. В этих условиях математическое моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) становится основным инструментом обоснования конструктивных решений. Однако даже детерминированные модели не позволяют в полной мере оценить влияние каждого фактора и их совместного действия на прочность конструкции. Решением проблемы является интеграция методов математического моделирования с аппаратом математической статистики, что обеспечивает не только количественную оценку, но и статистическую обоснованность выводов.

Демонстрация необходимости и преимуществ применения статистического анализа при математическом моделировании показано на примере исследования НДС составных деревянных шпал (СДШ) с бесклеевым соединением типа «шип-паз».

В основу исследования положен полный факторный эксперимент, реализованный в среде Microsoft Excel с использованием надстройки «Анализ данных». Варьируемыми параметрами являлись: тип шпалы (I, II, III), сорт древесины (1, 2, 3), уровень боковой нагрузки N_d (5, 10, 15 кН),

длина шипа $l_{ш}$ (110–150 мм с шагом 10 мм) и размер основания шипа $b_{о.ш}$ (50–80 мм с шагом 10 мм) [1]. Общее количество расчетных вариантов составило 540, что потребовало применения статистических методов для выявления скрытых закономерностей и оценки значимости влияния факторов.

Корреляционный анализ. Матрица парных коэффициентов корреляции Пирсона (таблица 1) позволила установить тесноту и направление связей между входными параметрами и расчетными напряжениями.

Таблица 1 – **Матрица парных корреляций Пирсона**

Переменная	N_d, кН	$l_{ш}$, мм	$b_{о.ш}$, мм	$\sigma_{t.o.d}$, МПа	τ_d*, МПа
N_d	1,00	0,00	0,00	0,83	0,70
$l_{ш}$	0,00	1,00	0,00	–0,19	–0,36
$b_{о.ш}$	0,00	0,00	1,00	–0,45	0,10*
$\sigma_{t.o.d}$	0,83	–0,19	–0,45	1,00	0,74
*Коэффициент незначим при p > 0,05.					

Анализ показал, что доминирующим фактором, определяющим растягивающие напряжения $\sigma_{t.o.d}$, является боковая нагрузка N_d (r = 0,83). Умеренная отрицательная связь $\sigma_{t.o.d}$ с $b_{о.ш}$ (r = –0,45) подтверждает эффективность увеличения ширины основания шипа для снижения растягивающих напряжений. Слабая отрицательная связь τ_d с $l_{ш}$ (r = –0,36) свидетельствует о положительном влиянии удлинения шипа на снижение скалывающих напряжений. Отсутствие значимой связи между τ_d и $b_{о.ш}$ (r = 0,10; p = 0,08) согласуется с расчетной моделью.

Регрессионный анализ. На основе метода наименьших квадратов получены линейные множественные регрессионные модели, позволяющие прогнозировать напряжения для любой комбинации варьируемых параметров:

$$\hat{\sigma} = 1{,}1640 + 0{,}102\, N_d - 0{,}0043\, l_{ш} - 0{,}0095\, b_{о.ш};$$

$$\hat{\tau} = 0{,}395 + 0{,}0182\, N_d - 0{,}0017\, l_{ш} - 0{,}0005\, b_{о.ш}.$$

Все коэффициенты регрессии значимы при $p < 0{,}001$ (кроме коэффициента при $b_{о.ш}$ для τ_d, p = 0,09). Коэффициент детерминации R^2 для модели σ составил 0,958, что указывает на высокую объясняющую способность.

Дисперсионный анализ (ANOVA). С использованием F-критерия Фишера количественно оценен вклад каждого фактора в общую дисперсию откликов. Установлено, что вклад боковой нагрузки N_d в изменение $\sigma_{t.o.d}$ и τ_d превышает 60 % общей дисперсии (F = 1320 и 950 соответственно, $p < 0{,}001$). Влияние $b_{о.ш}$ на $\sigma_{t.o.d}$ статистически значимо (F = 94, $p < 0{,}001$), влияние $l_{ш}$ на τ_d также значимо (F = 62, $p < 0{,}001$). Взаимодействия факторов слабы и объясняют менее 3 % дисперсии.

Прогнозирование предельной нагрузки. На основе полученных регрессионных моделей и нормативных значений допускаемых сопротивлений древесины сосны для растяжения вдоль волокон и скалывания вдоль волокон была выполнена оценка предельной боковой нагрузки для составной деревянной шпалы. Для этого в уравнения подставлялись оптимальные геометрические параметры соединения, а напряжения приравнивались к соответствующим допускаемым значениям для каждого сорта древесины. Расчёт показал, что для всех рассмотренных сортов лимитирующим критерием прочности является сопротивление скалыванию вдоль волокон, а не растяжение. С учётом статистической неопределённости, а именно использования верхних границ 95%-х прогнозных интервалов, была определена предельная боковая нагрузка, которая составила 60 кН. Это значение означает, что при данной нагрузке с вероятностью 95 % фактические напряжения в соединении не превысят расчётных сопротивлений. Полученная предельная нагрузка в 4 раза превышает расчётную нагрузку 15 кН, характерную для малодеятельных путей и путей необщего пользования, что свидетельствует о значительном запасе прочности конструкции. Таким образом, установленная предельная нагрузка 60 кН подтверждает работоспособность и надёжность предложенной конструкции СДШ в условиях эксплуатации на малодеятельных путях.

Преимущества статистического анализа. Применение статистических методов при математическом моделировании НДС СДШ позволило:

– объективно выявить доминирующие факторы и ранжировать их по степени влияния;

– получить количественные зависимости напряжений от геометрических параметров соединения и нагрузки;

– проверить статистическую значимость полученных зависимостей и оценить их точность;

– обосновать оптимальные размеры шипового соединения (ширина основания – 70 мм, длина – 150 мм);

– спрогнозировать предельную нагрузку с заданной вероятностью;

– снизить субъективность при принятии проектных решений.

Таким образом, интеграция статистического анализа в математическое моделирование является не просто дополнением, а необходимым условием получения достоверных и практически значимых результатов. Это особенно важно при исследовании сложных составных конструкций, где взаимное влияние множества факторов неочевидно, а экспериментальная проверка всех возможных комбинаций затруднена или невозможна. Статистический анализ обеспечивает переход от качественных оценок к количественным, что повышает надежность и обоснованность инженерных решений.

Список литературы

1 **Романенко, В. В.** Оценка проектных решений по изготовлению составных деревянных шпал / В. В. Романенко, П. В. Ковтун, А. О. Власенко // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БИИЖТа – БелГУТа, Гомель, 16–17 нояб. 2023 г. В 2 ч. / Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель, 2023. – Ч. 1. – С. 417–419.

УДК 625.1:51.001.57

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТОВ РИХТОВКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КРИВЫХ СРЕДСТВАМИ АВТОМАТИЗАЦИИ

В. В. РОМАНЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Р. П. БЕРНЕЙ
Институт «Белжелдорпроект», г. Гомель

П. Д. ЧЕКАНОВ
КПРСУП «Гомельоблдорстрой» ПКП «Гомельпроект», Республика Беларусь

Железнодорожный путь является сложным инженерным сооружением, геометрическое положение которого определяет плавность хода, устойчивость рельсошпальной решетки и безопасность движения. В кривых путь работает в более тяжелых условиях, так как к вертикальным нагрузкам добавляются боковые силы. Нарушения геометрии кривой приводят к росту боковых ускорений, повышенному износу рельсов и колес, угрозе безопасности движения поездов. Основной способ восстановления положения пути в плане – рихтовка, при которой рельсошпальная решетка перемещается в расчетное положение, а величины сдвижек назначаются по промерам, проектным данным и установленным допускам [1].

В практике текущего содержания применяется «метод стрел изгиба», основаный на измерении отклонения рельсовой нити от хорды заданной длины. Набор стрел через равный шаг позволяет построить фактическую картину кривой, выявить резкие переломы и оценить плавность изменения кривизны [2].

Основная расчетная величина – разность смежных стрел $\Delta f = f_{i+1} - f_i$. Положительное значение означает нарастание стрелы, отрицательное – уменьшение. Большая абсолютная величина Δf указывает на резкое изменение формы кривой. В переходных кривых Δf должна изменяться предсказуемо, в круговой части – быть близкой к устойчивому уровню. Резкие скачки требуют дополнительного внимания.

Актуальность автоматизации обусловлена необходимостью сокращения времени подготовки рихтовочных расчетов, снижения трудоемкости обработки ведомости стрел и уменьшения вероятности ошибок инженера. При ручной обработке выполняются повторяющиеся операции: расчет разностей соседних стрел, сравнение с допуском, назначение сдвижек, проверка после перерасчета, подготовка графиков. Это требует высокой концентрации, занимает много времени и затрудняет вариантный анализ.

Для автоматизации были проработаны следующие задачи: анализ предметной области, описание метода стрел изгиба, разработка алгоритма расчета фактической и проектной кривой, проектирование интерфейса, реализация расчетного ядра на JavaScript, тестирование на наборах исходных данных [3].

Ожидаемая практическая значимость – быстрое получение расчетной ведомости, визуальное сравнение фактического и расчетного положения кривой, выявление превышений и подготовка материалов для инженерной проверки.

Программа автоматизирует:

– расчет разности стрел изгиба Δf;

– проверку допуска по скорости движения;

– построение графика фактической кривой;

– построение проектной кривой по среднему значению стрел на круговой части;

– подбор сдвижек и поправок;

– построение результирующей кривой;

– контроль результата.

Программа не заменяет натурную проверку и не является распоряжением на работы – она формирует предварительный расчет, который специалист использует при принятии решения.

Проект реализован как одностраничное веб-приложение по архитектуре Serverless Client-side. Использованы: Vite для сборки; библиотека docx для генерации .docx; Canvas 2D API для графиков; localStorage для сохранения настроек.

Структура: index.html – интерфейс; styles.css – оформление; script.js – вычислительное ядро; report.js – отчеты; block-manager.js – настройки интерфейса. Интерфейс разделен на зоны: глобальные настройки, ввод параметров пути, графический блок, результаты, паспортная панель.

Алгоритм: сбор и валидация данных; расчет Δf; выбор допуска по скорости; построение проектной трапеции; поиск точек с превышением допуска. Если превышений нет – план без сдвижек. Иначе перебираются варианты сдвижек, рассчитываются поправки и новые стрелы f_1; в режиме «с перерасчетом» проверка повторяется до четырех раз, пока разности не уложатся в допуск. Оптимальный вариант выбирается по числу превышений, максимальной разности, количеству сдвижек и суммарному перемещению. При равном качестве предпочтение отдается варианту с меньшим числом сдвижек. Результаты выводятся в сводной таблице и на графике: фактическая, проектная и расчетная кривые, линия Δf (рисунок 1).

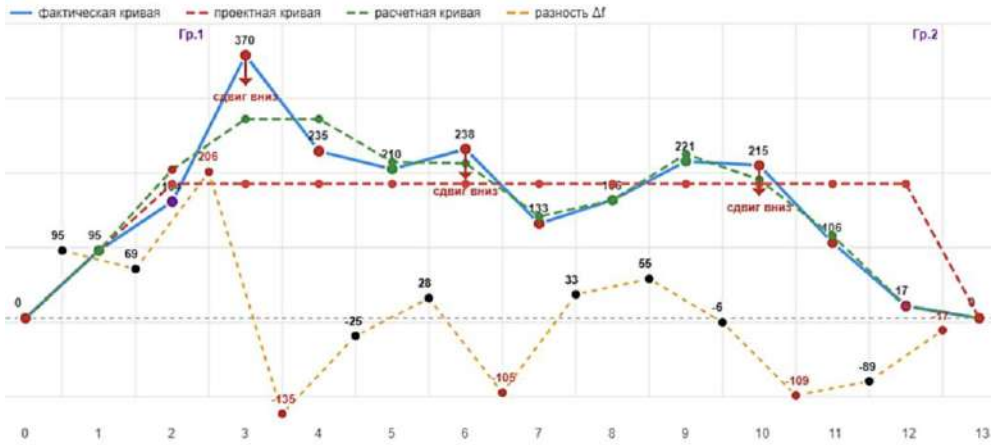


Рисунок 1 – Графики результатов расчета

Валидация срабатывает при нажатии «Рассчитать» до вычислений. Проверяются обязательные поля, корректность чисел, логическая согласованность пар координат, вложенность круговой вставки. Ошибки выводятся в модальном окне средствами приложения, без стандартного alert(), что не нарушает рабочий процесс.

Апробация включала функциональное тестирование и проверку устойчивости к ошибочному вводу. Проверены импорт Excel, расчет Δf, выбор допуска по скорости, переключение режимов, экспорт графика. Выполнены расчеты на четырех наборах данных с разной формой кривых. Подтверждена корректность вычислений и валидации.

Разработанное веб-приложение позволяет сократить время подготовки рихтовочных расчетов, снизить трудоемкость обработки ведомости стрел, уменьшить вероятность ошибок инженера, повысить наглядность и проверяемость результатов за счет графиков и таблиц, обеспечить вариантный анализ и формирование готового отчета. ПО возможно внедрить в производственную деятельность путевого хозяйства Белорусской железной дороги.

Список литературы

1 СТП БЧ 09150.56.010-2005. Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ : утв. приказом Нач. Бел. ж. д. от 29.06.2006 № 221Н. – Введ. 01.07.06. – Минск : Бел. ж. д., 2006. – 283 с.

2 **Бринь, М. Я.** Расчёт элементов и разбивка железнодорожных кривых : учеб. пособие / М. Я. Бринь, Н. В. Канашин, В. И. Полетаев ; под ред. М. Я. Бриня. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2008. – 36 с.

3 **Сапрыкин, А. Н.** Основы веб-программирования: HTML 5, CSS 3, JavaScript : учеб. пособие для вузов / А. Н. Сапрыкин. – М. : Texbooks, 2020. – 288 с.

УДК 674.05:625.142

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СОСТАВНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ШПАЛ С ПОЗИЦИИ МАКСИМАЛЬНОГО ВОВЛЕЧЕНИЯ КОРОТКОМЕРНЫХ ОБРЕЗКОВ

В. В. РОМАНЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

А. О. ВЛАСЕНКО
Белорусская железная дорога, г. Борисов

Основным производителем шпалопродукции в Республике Беларусь является ОАО «Борисовский шпалопропиточный завод» (БШПЗ), где ежегодно перерабатывается значительный объем пиловочного сырья. При изготовлении переводных брусьев длиной от 3,0 до 5,5 м из пиловочного бревна длиной 5,5–6,0 м образуются невостребованные обрезки длиной от 0,25 до 2,50 м, которые не пригодны для производства стандартных шпал длиной 2,75 м [1].

Предлагаемая конструкция составной деревянной шпалы (СДШ) – это шпала, состоящая из двух или более продольных элементов, изготовленных из короткомерных пиломатериалов и объединенных в единую несущую конструкцию. В отличие от цельной шпалы, СДШ позволяет использовать нестандартные отрезки брусьев, которые остаются после раскроя пиловочного сырья на переводные и мостовые брусья. Основная идея СДШ заключается в том, чтобы за счет рационального соединения коротких элементов получить изделие с геометрическими размерами стандартной шпалы (в первую очередь длиной 2,75 м) и достаточной несущей способностью для эксплуатации на малодеятельных путях.

Обрезки – это короткомерные остатки пиломатериалов, образующиеся при вырезке переводных брусьев различной длины. Согласно данным БШПЗ, с одного среднестатистического комплекта переводных брусьев остается в среднем 71 обрезок длиной до 2,5 м. Наиболее значимыми для производства СДШ являются обрезки длиной более 1,5 м – 43,25 шт. (60,8 % от общего объема) и длиной более 0,75 м – 59,75 шт. (84,1 % от общего объема). Именно эти фракции могут быть вовлечены в производство СДШ без дополнительной заготовки деловой древесины.

Задачи, которые должны решаться при создании СДШ, сформулированы следующим образом:

– использовать нестандартные короткомерные пиломатериалы;

– обеспечить соединение элементов без дополнительных затрат – без применения клея, металлических креплений, специально изготавливаемых деревянных нагелей или стержней, защитных оболочек и сложных технологических операций;

– сохранить целостность сечения и минимизировать концентрацию напряжений; расположить узловые соединения вне подрельсовой зоны;

– обеспечить равномерность передачи нагрузки на балласт, отсутствие жесткой опоры в середине шпалы и технологичность изготовления.

Анализ патентных и литературных источников показывает, что существующие технические решения СДШ, как правило, предполагают использование клеевых составов, металлических креплений (болтов, нагелей, хомутов), полимерных или бетонных оболочек, что удорожает изделие,

усложняет технологию и снижает экологическую безопасность. При этом во многих конструкциях стыки размещены в зоне подрельсовой подкладки, что создает концентрацию напряжений и снижает надежность рельсового скрепления.

Рассмотрим основные патентные решения с позиции возможности максимального вовлечения короткомерных обрезков [2].

RU 2 013 478 C1 (№ 1), SU 1412961 A1 (№ 2), BY 11943 U (№ 3), US 3 813 038 A (№ 4), RU 215 747 U1 (№ 5) – ориентированы на длинномерные заготовки, содержат металлические нагели, болты, нити-перевязки; стык часто находится в подрельсовой зоне; не решают задачу утилизации коротких обрезков.

SU 1782749 A1 (№ 6), RU 65 423 U1 (№ 7), RU 2 099 460 C1 (№ 8) – допускают короткие элементы, но требуют клея, сложной технологии, многослойности, материалоемки.

SU 1670021 A1 (№ 9), RU 2 536 569 C2 (№ 10), RU 2 306 376 C2 (№ 11) – требуют резиновой оболочки, металлических хомутов, пластикового корпуса или бетонной заливки.

RU 2 256 020 C1 (№ 12) и RU 2 262 564 C1 (№ 13) – наиболее близки: используют бруски до 1,0 м и 0,5 м, но соединяют их деревянными стержнями с резьбой или металлическим стержнем с гайками, что требует токарной/резьбонарезной обработки.

Систематизация патентных решений показывает, что основным препятствием для использования короткомерных пиломатериалов в производстве шпалопродукции является необходимость создания надежного соединения между элементами, которое не снижало бы несущую способность шпалы и не вызывало необходимости разработки дополнительных технологий. Патенты № 1–5 позволяют уменьшить диаметр бревен, но ориентированы на заготовки, равные по длине стандартной шпале (2,75 м), что полностью исключает возможность использования обрезков. Во всех этих конструкциях стык двух брусков расположен по оси шпалы, а в ряде решений крепежные элементы находятся в зоне подкладки, что может снизить надежность узла рельсового скрепления и вызвать ускоренное разрушение древесины.

Патенты № 6 и 7 допускают использование брусков длиной не менее ¼ длины стандартной шпалы, но требуют применения клеевых составов. Изготовление клееной конструкции может привести к сокращению срока эксплуатации из-за деградации клеевых швов под действием циклических нагрузок и переменных климатических условий. Патенты № 12 и 13 используют короткие бруски, но заключают их в пластиковый корпус или бетонную оболочку, что также требует дополнительных материалов и технологий (литье, герметизация). Наиболее близкими по решению поставленной задачи являются патенты № 10 и 11, где используют короткие бруски длиной от 0,5 до 1,0 м. Однако для соединения брусков необходимы деревянные стержни с резьбой или металлический стержень, изготовление которых – дополнительные операции, требующие токарной или резьбонарезной обработки.

Таким образом, ни одна из проанализированных конструкций не предусматривает соединение коротких брусков без клеевых составов и без изготовления специальных нагелей либо стержней. Любые применяемые способы – склеивание, болтовое крепление, хомуты, стержни, оболочки – требуют либо дополнительных комплектующих, либо усложнения технологического процесса, что не согласуется с ресурсосбережением и экономической целесообразностью. Выполненный анализ убедительно показывает: известные технические решения не дают возможности одновременно достичь трёх ключевых целей: задействовать нестандартные короткомерные пиломатериалы; соединить элементы без дополнительных затрат – без клея, металлических или специально изготавливаемых деревянных нагелей/стержней, без оболочек и сложных операций; сохранить целостность сечения и снизить концентрацию напряжений.

Следовательно, возникает потребность в создании новой конструкции составной деревянной шпалы, обеспечивающей соединение коротких пиломатериалов без клея и дополнительных крепежных элементов только за счет геометрического замыкания, в частности клиновых, пазовых или шпоночных соединений, не предполагающих сверления и специальной обработки. Разрабатываемая СДШ выполнена трехэлементной и содержит два бесклеевых узла типа «шип-паз», размещенных вне подрельсовой зоны. Длина крайних элементов составляет 1,15 м, среднего – 0,75 м. Подобная схема дает возможность применять обрезки длиной не менее 1,25 м для крайних элементов и не менее 0,75 м для среднего. Согласно результатам анализа объемов обрезков, из одного комплекта переводных брусьев удается получить до 20 СДШ при полном использовании всех обрезков либо по-

рядка 13 СДШ, если не учитывать обрезки длиной 2,50 м, которые могут быть направлены на реализацию в качестве пиломатериалов. Технологический процесс изготовления предусматривает 18 резов и не требует применения клея, металлических креплений или защитных оболочек.

Таким образом, анализ существующих СДШ с позиции максимального вовлечения обрезков показывает, что известные конструкции либо не рассчитаны на короткомерное сырье, либо требуют дополнительных крепежных и связующих материалов, либо размещают узлы соединения в подрельсовой зоне. Предлагаемое техническое решение устраняет эти недостатки и обеспечивает утилизацию до 84 % технологических обрезков переводных брусьев, что создает устойчивую сырьевую базу для производства СДШ без дополнительной заготовки деловой древесины.

Список литературы

1 **Невзорова, А. Б.** Оценка несущей способности составных деревянных шпал, уложенных в путь / А. Б. Невзорова, В. В. Романенко // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – 2024. – № 3 (98). – С. 5–12.

2 **Романенко, В. В.** Ресурсосберегающая технология изготовления составных деревянных шпал / В. В. Романенко, А. Б. Невзорова // Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2023. – № 2 (270). – С. 143–151.

УДК 625.17.004.67

УЧЕТ МЕСТНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕМОНТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

В. В. РОМАНЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

А. В. КУРАШ
Белорусская железная дорога, г. Радошковичи

З. М. КРАВЦОВ
Белорусская железная дорога, г. Витебск

Типовые технологические процессы разрабатываются для усредненных условий и не учитывают конкретное расположение объектов: фактическую протяженность кривых и прямых, наличие искусственных сооружений, переездов, изолирующих стыков, реальные объемы и местные препятствия. Это ведет к избыточным трудозатратам, приближенному определению продолжительности «окон» и неоптимальному использованию машин и ресурсов, поэтому актуальна оптимизация типовых процессов применительно к конкретному участку.

Оптимизация технологического процесса восстановительного ремонта на перегоне Фаниполь – Помыслище 768–773 км выполняется за счет разработки нетипового процесса, учитывающего конкретные условия, уточнения объемов, рационального распределения фронтов и снижения трудовых затрат. Участок – I главный путь, протяженность 5400 п. м, обслуживает Минская дистанция пути. Верхнее строение: бесстыковой путь, рельсы Р65 в плетях до 800 м, скрепление КБ, шпалы железобетонные, балласт щебеночный. После ремонта допускаемая скорость: пассажирские поезда – 120 км/ч, грузовые – 80 км/ч. Предусмотрена укладка новой рельсошпальной решетки с железобетонными шпалами СБ и плетями бесстыкового пути [1].

План линии при ремонте не меняется. Радиусы кривых уточнены по оптимальным сдвижкам. Длины переходных кривых назначены по требуемому возвышению [2]. В рамках разработки технологического процесса составлены схемы и ведомости рихтовок с расчетными сдвижками на каждой «двадцатке». Скорости движения приняты по техническим требованиям, возвышения наружной нити – по приказу № 324 НЗ от 12.04.2021 с проверкой. Укорочение внутренней нити определено как произведение расстояния между осями рельсов (1600 мм) на угол поворота в радианах; на 1 градус – 2,8 см.

Продольный профиль запроектирован с максимальным спрямлением при минимальном расходе балласта. Исправление искажений – подъемкой или срезкой балласта. Минимальная длина прямых элементов – 200 м. Переломы профиля с разностью уклонов более 0,0023 сопряжены вертикальны-

ми кривыми R = 15000 м. Профиль запроектирован вписыванием вертикальных круговых кривых R = 40…65 тыс. м. Ординаты определяются через точку пересечения уклонов, подбор радиуса, вычисление начала и конца кривой; через 50 м отметки подсчитываются суммированием (вогнутая) или вычитанием (выпуклая) сдвижек от кривой. Сдвижка – квадрат расстояния от конца кривой до точки, деленный на удвоенный радиус. По расчетным отметкам определены необходимые величины досыпок и срезок балласта.

Рельсовые плети запроектированы определенной длины при условной температуре (среднее оптимального интервала закрепления). Концы совмещены со стыками инвентарных рельсов с учетом переездов, изолирующих стыков и сигналов. Между плетями и звеньевым путем укладываются уравнительные рельсы 12,5 м по СТП БЧ 56.269-2013 и СТП БЧ 56.373-2017, соединяемые шестидырными накладками с высокопрочными болтами. Учтены поправки на температуру рулетки и укорочение внутренней нити. Каждой паре плетей присвоен номер по пикетажу начала с указанием сторонности (П/Л). Например, плеть 768-Л – 395,68 м (767 + 87,36 – 771 + 83,09), 768-П – 395,57 м, 771-Л – 350,14 м и т. д.

При типовом процессе фронты работ (участок производства ремонта в одно «окно») были бы равновеликими (по ~1000 м). При оптимизации фронт определен по расположению объектов (переезд, изолирующий стык) и равномерности, исходя из чего назначены 7 участков: шесть по 800 м (ПК 768 + 00 – 776 + 00, 776 + 00 – 784 + 00, 784 + 00 – 792 + 00, 792 + 00 – 800 + 00, 800 + 00 – 808 + + 00, 808 + 00 – 816 + 00) и один 600 м (816 + 00 – 822 + 00). Основные работы по замене рельсошпальной решетки выполняются в «окна» через день; очистка балласта – в одно «окно» на каждом участке.

Ведомость затрат труда составлена по конкретным объемам на участке 800 м [3]:

– подготовительные работы – 1327 чел.-мин;

– основные по замене рельсошпальной решетки – 6617 чел.-мин;

– очистка щебеночного балласта – 2205 чел.-мин;

– отделочные работы – значительный объем.

Ведомость включает снятие знаков, смазку болтов, подготовку мест заезда, демонтаж стеллажей, зарядку ВПО-3000, закрытие перегона, демонтаж стыков, резку плетей, демонтаж и монтаж рельсошпальной решетки краном УК 25/9-18, срезку и планировку балласта, установку зазоров, монтаж рубок и стыков, регулировку шпал и пути, выправку ВПО-3000, выгрузку балласта из ХДВ, рихтовку ЭЛБр-1, монтаж изолирующих стыков, подбивку ЭШП, зарядку, очистку и разрядку RM-80, работы ВПР-09, снятие и установку знаков, срезку обочин, очистку канав и лотков, выправку профиля и кривых, отделку SSP-110, стабилизацию DGS-62, подрезку балласта, удаление засорителей, монтаж стеллажей [4].

Сборка новой рельсошпальной решетки, демонтаж и переборка снятой выполняются на базе СП ПМС Радошковичи. При подготовке удаляются препятствия (колодцы, предельные столбики, КТСМ, КГУ), устраиваются места заезда бульдозеров. Переездные настилы демонтируются до основного «окна» с укладкой временных.

Глубокая очистка балласта производится машиной RM-80 на 35 см. Новый балласт выгружается из хоппер-дозаторов. Исправление профиля с вертикальными кривыми – ВПР-09 по проекту. Срезка обочин и очистка кюветов – МКТ, в местах препятствий – вручную. Отделка пути и планировка междупутья – ССП-110. Пикетные знаки снимаются дистанцией пути до основных работ и устанавливаются в конце отделочных; остальные знаки – в начале и конце «окна».

Замена рельсов плетями выполняется с применением крана УК-25/9-18 с приспособлением для надвижки. Плети транспортируются из РСП-10 ст. Орша. До закрытия перегона хозяйственные поезда сосредотачиваются на ограничивающей станции. Отправление на перегон – по Инструкции по движению поездов и маневровой работе по согласованию с ДНЦ; на участках с автоблокировкой – по сигналам вслед за последним графиковым поездом. Перед открытием перегона путь приводится в состояние безопасного пропуска поездов согласно п. 6 СТП БЧ 56.232–2012. Ответственность за безопасность несет руководитель работ.

При типовом процессе фронты были бы равновеликими (6 участков по 900 м), что не учитывает расположение объектов. Оптимизация дала 7 участков (шесть по 800 м, один 600 м), что позволяет:

– не разбивать объекты (переезды, изолирующие стыки);

– точнее определить объемы производства работ;

– исключить необоснованные работы (могут быть включены в типовые);
– снизить трудозатраты;
– рационально использовать машины;
– повысить точность определения продолжительности «окна».

Продолжительность «окна» – 5 ч 44 мин, что соответствует технологическим возможностям и обеспечивает безопасный пропуск поездов. Оптимизация позволяет повысить точность планирования, рационально использовать ресурсы, сократить непроизводительные затраты и обеспечить высокое качество ремонта.

Список литературы

1 **Романенко, В. В.** Технология восстановительного ремонта бесстыкового пути : пособие / В. В. Романенко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – 127 с.

2 СТП БЧ 09150.56.010-2005. Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ : утв. приказом Нач. Бел. ж. д. от 29.06.2006 № 221Н. – Введ. 01.07.2006. – Минск : Бел. ж. д., 2006. – 283 с.

3 Типовые нормы времени на работы по ремонту верхнего строения пути : утв. приказом Нач. Бел. ж. д. от 24.06.2015 № 220 Н. – Введ. 30.06.2015. – Минск : Бел. ж. д., 2015. – 225 с.

4 **Романенко, В. В.** Машинизация путевых работ : учеб.-метод. пособие / В. В. Романенко. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 119 с.

УДК 625.7

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ФРОНТАЛЬНЫХ ДОРОЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ

Э. П. САЗАНЧУК, Н. И. РЕМЕЗ
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Повышение уровня безопасности движения на автомобильных дорогах требует улучшения конструкций удерживающих устройств – особенно там, где автомобиль может столкнуться с дорожным ограждением в торцевой его части. Это зоны разветвления потоков, клиновидные участки съездов, разрывы разделительных полос, места для поворотов налево и разворотов, а также начальные участки боковых дорожных ограждений. В таких условиях продольные барьерные ограждения не всегда гасят энергию удара так, как нужно, и являются неэффективными. Одно из перспективных направлений – телескопические конструкции с сотовыми наполнителями. Сотовая структура внутренних блоков-гасителей обеспечивает контролируемую пластическую деформацию, постепенно поглощающую энергию соударения и снижающую пиковые нагрузки на автомобиль и его пассажиров. В работе рассмотрены область применения фронтальных ограждений, особенности их конструкции, требования к размерам и креплению сотовых элементов, а также показатели эффективности таких систем.

Самая сложная ситуация – фронтальный удар, когда автомобиль бьётся в торец ограждения или в конструкцию, стоящую почти перпендикулярно направлению движения. При боковом столкновении часть энергии уходит на скольжение и перенаправление машины вдоль ограждения. При фронтальном ударе значительная часть кинетической энергии передаётся прямо на защитную конструкцию и на автомобиль. Поэтому на таких участках нужны специальные фронтальные удерживающие устройства, которые не просто остановят транспортное средство, а управляемо поглотят энергию его движения [1].

Необходимость фронтальных удерживающих устройств определяется прежде всего геометрией дорожного участка и направлением возможного столкновения. Для дорог Республики Беларусь этот подход особенно актуален при проектировании разделительных полос, транспортных развязок, участков с изменением направления движения и зон, где ограждение заканчивается прямо по направлению возможного движения транспортного потока. Торцевой участок металлического барьерного ограждения нельзя рассматривать как полноценную замену фронтальному удерживающему устройству. Выбор фронтального устройства должен учитывать категорию дороги, расчётную скорость, состав потока, геометрию участка и требуемый уровень удерживающей способности [1].

Для дорожных условий Республики Беларусь при выборе долговечных конструктивных особенностей соединений элементов дорожных ограждений нужно дополнительно учитывать температурные перепады и переходы через ноль градусов Цельсия, особенности влажности воздуха, а также эксплуатационные условия в зимний период.

Эффективность фронтального удерживающего устройства нужно оценивать комплексно. Сам факт остановки автомобиля – ещё не достаточный критерий безопасности. Важны величина поглощённой энергии, характер замедления, деформация автомобиля, траектория его движения после столкновения, сохранение целостности пассажирского пространства и отсутствие опасного проникновения элементов ограждения в салон [2].

В нормативной практике используются такие показатели, как удерживающая способность, индекс тяжести травмирования, выбег транспортного средства и сохранение геометрии защищаемой зоны. В мировой практике современные требования к фронтальным ограждениям предусматривают контроль отсутствия опрокидывания автомобиля, проникновения элементов конструкции дорожного ограждения в салон, сохранения внутреннего пространства автомобиля и ограничения индекса тяжести травмирования [2].

Удерживающая способность характеризует энергию, которую конструкция способна воспринять при расчётном столкновении. Для разных уровней дорожных ограждений используются соответствующие значения удерживающей способности. Для фронтального устройства особенно важна способность поглощать энергию при ударе под прямым углом.

Наиболее перспективной для дальнейшего исследования представляется комбинация телескопического механизма и сотового энергопоглощающего наполнителя. Такая конструкция может включать наружный направляющий каркас, последовательно перемещающиеся телескопические секции, фронтальную ударную часть и набор сотовых энергопоглощающих модулей [1].

Перспективное направление совершенствования телескопических фронтальных ограждений – применение сотовых энергопоглощающих наполнителей. Их преимущества: относительно малая масса, возможность управлять жёсткостью за счёт изменения геометрии ячеек и толщины стенок, высокая удельная способность к поглощению энергии и возможность модульной замены повреждённых элементов.

При столкновении автомобиля фронтальная часть воспринимает нагрузку и передаёт её на телескопические элементы. Последовательное вхождение секций друг в друга обеспечивает контролируемое перемещение конструкции, а сотовый наполнитель между силовыми элементами деформируется и поглощает часть кинетической энергии. В результате общий процесс торможения автомобиля может быть распределён на большие расстояние и время.

Особый интерес представляют конструкции с переменной плотностью сотового наполнителя. В начале пути деформации может использоваться элемент с относительно низкой жёсткостью – для ограничения первоначального пикового усилия, а в последующих секциях – более плотные элементы, способные воспринимать возрастающую нагрузку. Такой градиент жёсткости позволяет рациональнее распределять поглощение энергии по длине устройства.

Проведённый анализ показывает, что при проектировании дорожных удерживающих устройств нужно учитывать не только наличие ограждения, но и характер возможного взаимодействия автомобиля с его конструкцией. На участках разветвления потоков, в местах разрывов разделительной полосы, а также перед торцевыми участками боковых ограждений существует вероятность фронтального столкновения, при котором традиционная барьерная конструкция не обеспечивает нужного характера поглощения энергии.

При этом для практического применения в дорожных условиях необходимо дополнительно исследовать оптимальный размер ячейки, толщину материала, количество слоёв, длину и ширину сотового блока, схему его крепления к телескопическому каркасу, влияние температуры и коррозионных факторов, а также изменение характеристик при косом и прямом ударе. Окончательная оценка конструкции должна выполняться по результатам натурных либо подтверждённых расчётных испытаний с учётом требований к удерживающей способности, индексу тяжести травмирования, траектории выбега автомобиля и сохранности пассажирского пространства.

Таким образом, сочетание телескопического принципа работы и сотового энергопоглощающего наполнителя – перспективное направление создания фронтальных дорожных ограждений нового поколения, способных эффективнее преобразовывать кинетическую энергию столкновения в контролируемую деформацию конструкции. Дальнейшее развитие этого направления целесообразно связывать с оптимизацией геометрии сотового наполнителя, использованием градиентных структур и разработкой унифицированных сменных энергопоглощающих модулей, адаптированных к различным уровням удерживающей способности.

Список литературы

1 **Косухин, В.** Фронтальные удерживающие устройства / В. Косухин ; науч. рук. Н. И. Шишко // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / Белорус. нац. техн. университет ; редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 322–330.

2 **Шишко, Н. И.** Теоретические предпосылки оценки эффективности работы удерживающих устройств на автомобильных дорогах общего пользования / Н. И. Шишко, В. И. Адашкевич // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. Е. Кравченко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 98–105.

УДК 625.7/.8

РЕКОНСТРУКЦИЯ УЛИЦЫ С РАЗРАБОТКОЙ МЕРОПРИЯТИЙ ПО УКРЕПЛЕНИЮ ОСНОВАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

М. В. СВИБОВИЧ, Г. В. АХРАМЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Реконструкция городских улиц на слабых основаниях представляет собой одну из наиболее сложных и ответственных задач дорожного строительства. В условиях плотной городской застройки отсутствует возможность замены слабого грунта на более прочный или существенного увеличения толщины дорожной одежды. Этому препятствуют подземные коммуникации, близость зданий, ограниченные сроки производства работ и необходимость поддержания движения транспорта. В связи с этим возникает потребность в решениях, позволяющих укрепить основание без значительных объёмов земляных работ и существенного удорожания проекта. Одним из решений является применение геосинтетического материала, представляющего собой рулонные полотна или решётки из полимерных волокон, которые укладываются в дорожную конструкцию и воспринимают часть нагрузок, предотвращают перемешивание слоёв и отводят воду [1]. Основной функцией геотекстильного материала является укрепление грунта. Он обладает хорошей водопроницаемостью, что позволяет свободно пропускать воду, не допуская при этом вымывания грунтов [2].

Геосинтетика в дорожной конструкции выполняет несколько взаимосвязанных функций. Армирование, обеспечиваемое георешётками и геосетками, заключается в восприятии растягивающих напряжений и ограничении бокового смещения частиц зернистого материала [3]. Без такой прослойки под нагрузкой от автомобилей зернистый материал основания начинает расползаться, дорожная одежда теряет жёсткость и быстро разрушается. Геосинтетика ограничивает боковое смещение частиц, заставляет их работать совместно и тем самым увеличивает жёсткость основания. Нагрузка от колеса автомобиля распределяется на большую площадь, и давление на слабый грунт снижается [4, с. 4–10]. Разделение, реализуемое геотекстилем, предотвращает взаимопроникновение зернистого материала основания и слабого грунта земляного полотна. При отсутствии такой прослойки щебень постепенно «тонет» в слабом грунте, а грунт поднимается вверх. В результате основание теряет свои дренирующие и прочностные свойства. Геотекстиль работает как фильтр: он пропускает воду, но задерживает частицы грунта, сохраняя чёткую границу между слоями [5, с. 115–117]. Дренаж, обеспечиваемый некоторыми видами геосинтетики, позволяет отводить избыточную влагу из конструкции. Это особенно важно для переувлажнённых грунтов, которых в Беларуси очень много. Если вода застаивается в основании, оно теряет прочность, а зимой при замерзании может вспучиваться. Дренажные геокомпозиты помогают воде уходить и тем самым повышают надёжность дороги [6, с. 80–84].

Испытания по устройству основания дорожной одежды из щебня с устройством разделяющей и армирующей прослойки из геосетки двойного ориентирования были проведены научно-исследовательским институтом «БелдорНИИ» на республиканской дороге Р28 [7]. Полученные результаты показали, что при использовании геоматериалов в качестве промежуточного слоя в дорожной конструкции на отдельных участках модуль упругости на поверхности покрытия составил 300–322 МПа, а при использовании на других участках технологического слоя из асфальтогранулята толщиной 15 см модуль упругости составил 290–298 МПа. Применение прослойки из геоматериалов в качестве армирующей позволило уменьшить толщину щебёночного основания на 3 см и ис-

ключить технологический слой из асфальтогранулята. Этими свойствами обладает высокопрочная техническая ткань «Стаббудтекс», производимая в г. Минске из полиэфирных волокон, которая схожа с европейским аналогом «Stabilenka» [7].

Эмпирические методы не позволяют в полной мере учесть нелинейное поведение грунтов и реальное увеличение жёсткости зернистого слоя за счёт геосинтетики. В Беларуси развиваются механические подходы к расчёту дорожных конструкций с геосинтетическими прослойками. В БНТУ разработан новый дорожный методический документ, направленный на совершенствование проектирования дорожных одежд с учётом современных материалов. Исследования показывают, что армирование слабых грунтов уменьшает деформации основания примерно на 20–25 %, помогает эффективно воспринимать и перераспределять действующие нагрузки, а также снижать стоимость строительства. Применение армирующих и разделяющих прослоек в дорожных конструкциях позволяет повысить прочность и сдвигоустойчивость основания, уменьшить его толщину и достичь значительной экономии щебня, улучшить дренаж воды. Армирующие прослойки из полимерных двуосных георешеток (геосеток) устраивают на границе контакта «несущий слой основания из неукреплённого зернистого материала – песчаный подстилающий слой». Разделительные прослойки из синтетических геотекстильных полотен могут использоваться как на границе контакта слоя основания из щебня или щебёночно-гравийно-песчаной смеси и песчаного подстилающего слоя, так и на границе контакта дренирующего слоя из песка с грунтом земляного полотна.

На основе изучения отечественного и зарубежного опыта можно дать следующие практические рекомендации для реконструкции городских улиц на слабых основаниях. Для участков с наиболее слабыми грунтами, характерными, например, для Полесского региона или заболоченных территорий, целесообразно применять комбинацию георешётки и объёмной георешётки (геоячейки), поскольку такое сочетание обеспечивает максимальный прирост срока службы дорожной одежды. Армирующую прослойку при этом рекомендуется размещать в верхней трети зернистого основания – исследования показывают, что именно такое расположение даёт наибольшее снижение осадки и повышение несущей способности. В случае переувлажнённых грунтов и высокого уровня грунтовых вод следует использовать геокомпозиты с дренажными функциями, которые не только армируют, но и отводят воду. В стеснённых условиях городской реконструкции целесообразно применять методики расчёта, учитывающие повышение модуля упругости основания за счёт геосинтетики. Это позволяет точно подобрать требуемую толщину слоёв и избежать излишних затрат [8, с. 34–37]. Из белорусских материалов хорошо зарекомендовали себя геотекстиль «Дорнит» производства ОАО «Дунгис» (г. Могилёв) и техническая ткань «Стаббудтекс» производства ООО «Махина-ТСТ» (г. Минск) – оба прошли апробацию на республиканских дорогах и показали положительные результаты. Для повышения надёжности дорожной одежды городских улиц геосинтетические материалы следует применять в качестве армирующих, трещинопрерывающих, капилляропрерывающих и разделяющих прослоек в соответствии с требованиями ТКП 620, а расчёт конструкции с их использованием вести по методике, приведённой в указанном техническом кодексе.

Геосинтетические материалы являются эффективным и экономически обоснованным инструментом реконструкции городских улиц на слабых основаниях. Они выполняют сразу несколько функций: армируют, разделяют и дренируют. За счёт этого повышается несущая способность основания, снижаются деформации и увеличивается срок службы дорожной одежды. Опыт Беларуси подтверждает эффективность такого подхода. Всё это создаёт хорошие предпосылки для более широкого внедрения геосинтетических материалов при реконструкции улиц.

Список литературы

1 ТКП 669-2022 Автомобильные дороги. Разделительные и армирующие прослойки из геосинтетических материалов в нижних слоях дорожных одежд. Правила устройства : утв. постановлением М-ва трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь от 14.12.2022 № 107 ; введ. 01.03.2023. – Минск, 2022. – 31 с.

2 СТБ 2398-2015 Материалы геосинтетические. Геосетки и георешётки плоские для армирования дорожных конструкций. Технические условия. – Введ. 01.09.2015. – Минск : Госстандарт, 2015. – 34 с.

3 Дорожные одежды с армирующими и разделяющими прослойками из геосинтетических материалов // БелдорНИИ. – URL: https://beldornii.by (дата обращения: 01.10.2026).

4 **Красковский, С. В.** Применение полимерных материалов в дорожных конструкциях / С. В. Красковский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 23–24 апр. 2020 г. / Бел.-Рос. ун-т. – Могилев, 2020. – С. 166–168.

5 **Артемьев, А. А.** Расчёт дорожных конструкций, армированных объёмными георешётками / В. В. Артемьев, Г. А. Бессараб, А. А. Борозна // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2012. – № 2. – С. 115–117.

6 **Бабаскин, Ю. Г.** Определение осадки слабого грунта при временной пригрузке насыпи земляного полотна / Ю. Г. Бабаскин, А. С. Санец // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–19 дек. 2025 г. – Минск : БНТУ, 2026.

7 СТО 29424809-002-2014. Материалы геотекстильные рулонные СТАББУДТЕКС (STABBUDTEX). Технические условия // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/550757302 (дата обращения: 21.09.2026).

8 **Почтенная, В. С.** Усиление дорожных конструкций георешётками / В. С. Почтенная, В. Е. Петровский, Т. А. Полякова // Материалы конференции Белорусско-Российского университета. – Могилёв : Бел.-Рос. ун-т, 2021.

УДК 625.1

ПРИМЕНЕНИЕ PYTHON ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ВХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ УЧАСТКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ПРИ ИЗЛОМЕ РЕЛЬСА

М. М. СОКОЛОВ
Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация

Железнодорожный транспорт отличается от других видов транспорта в первую очередь именно наличием рельсов, а точнее элементов верхнего строения пути. Исторически с момента зарождения железных дорог к надёжности элементов, обеспечивающих непрерывную поверхность катания колёсных пар подвижного состава, предъявлялись повышенные требования. Причиной первых транспортных происшествий на железных дорогах являлся излом элементов подвижного состава (колесной пары или рамы) и элементов верхнего строения пути (рельсов или рельсовых скреплений). Контроль целостности рельсов производился визуально путевыми обходчиками, а в настоящее время для решения этой задачи применяются дефектоскопные тележки и вагоны-дефектоскопы.

При возникновении неисправности рельсовой нити или рельсового скрепления безусловно изменяются электрические параметры, характеризующие пропуск электрического тока по рельсовым нитям, т. е. изменяется электрическое сопротивление.

Для оценки уровня изменения входного сопротивления участка рельсовой линии при наличии повреждения в среде программирования Spider на языке Python была разработана и реализована модель участка рельсовой линии, представленная на рисунке 1 [1].

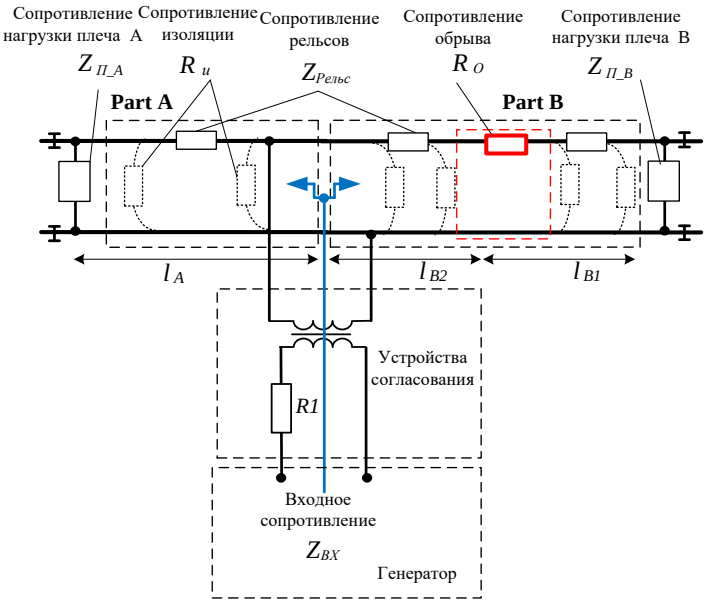


Рисунок 1 – Схема замещения участка рельсовой линии с изломом рельса

По результатам моделирования были получены графики изменения входного сопротивления для участка рельсовой линии длиной 2 км (два плеча по 1 км) на частоте сигнального тока 25 Гц. В качестве устройств согласования и устройств нагрузки рассматривалась стандартная аппаратура кодовой рельсовой цепи 25 Гц (ограничивающий резистор 200 Ом, соединительные провода, изолирующий трансформатор и дроссель-трансформатор, путевой фильтр) [2]. На рисунке 2 представлено изменение модуля (*а*), угла (*б*) активной (*в*) и реактивной (*г*) составляющих входного сопротивления для различных значений сопротивления изоляции и ординаты излома рельса. Значения левее значения «–1000 м» и правее значения «1000 м» характеризуют сопротивление рельсовой линии без излома (свободной и исправной).

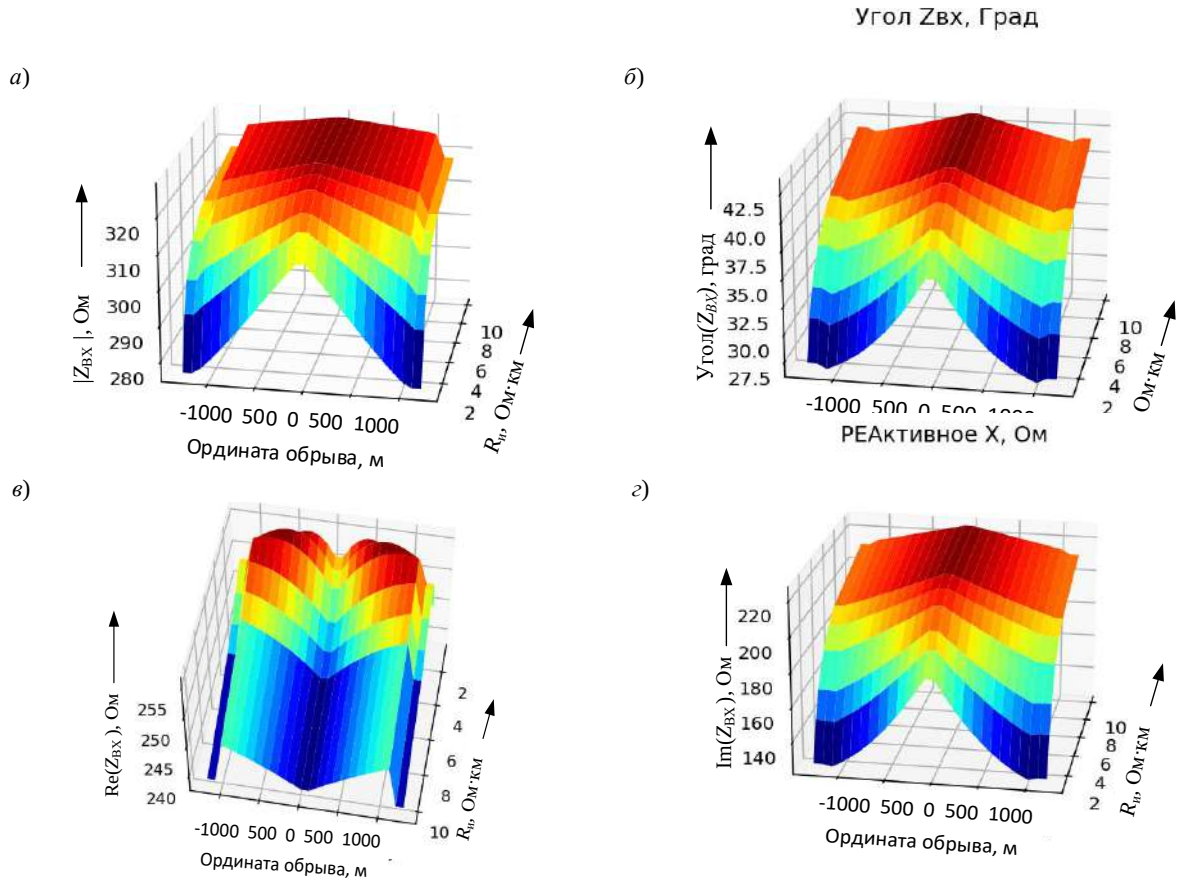


Рисунок 2 – Результаты моделирования

Полученные графики наглядно показывают изменение составляющих входного сопротивления рельсовой линии при различных ситуациях. Появление излома рельса приводит к увеличению модуля входного сопротивления за счет увеличения активной составляющей и не приводит к существенному изменению угла. В то же время значение угла (фазы) входного сопротивления может быть использовано при уточнении места (ординаты) излома рельса [3].

Список литературы

1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025667760 Российская Федерация. Имитационная модель рельсовой цепи : заявл. 15.04.2025 : опубл. 09.07.2025 / М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич, Д. А. Елизаров, А. И. Давыдов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения».

2 Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справ. / В. С. Аркатов, Ю. В. Аркатов, С. В. Казеев, Ю. В. Ободовский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Миссия-М, 2006. – 496 с.

3 **Sokolov, M.** Application of Conformal Mappings to Determine the Location of a Rail Break / M. Sokolov, A. Khodkevich // International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation. – Sochi, 2025. – P. 153–158. – DOI: 10.1109/RusAutoCon65989.2025.11177260.

УДК 625.7/.8:656.1.08

КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА АВАРИЙНОСТЬ: МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Н. А. СОЛОХИН
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Капитальный ремонт автомобильных дорог представляет собой комплекс работ, направленных на восстановление и улучшение транспортно-эксплуатационных характеристик дорожной одежды и элементов обустройства. В отличие от текущего ремонта, капитальный ремонт предполагает замену или восстановление конструктивных элементов дороги, что позволяет не только улучшить ровность покрытия, но и повысить уровень безопасности дорожного движения.

Связь между качеством дорожного покрытия и аварийностью подтверждается многочисленными исследованиями. Зарубежные данные свидетельствуют о том, что увеличение ровности покрытия приводит к снижению числа дорожно-транспортных происшествий. В частности, результаты исследований на дорогах Калифорнии показывают, что увеличение международного индекса ровности (IRI) на 1 % вызывает рост аварийности на 0,074–0,154 % в зависимости от применяемой модели оценки [1, с. 42–44]. Это означает, что улучшение ровности покрытия при капитальном ремонте напрямую способствует снижению количества ДТП.

Для оценки влияния дорожно-строительных работ на аварийность применяется методика расчёта коэффициента изменения аварийности (Кд), представляющего собой отношение средней годовой аварийности на участке после проведения работ к аналогичному показателю до их проведения. Если коэффициент меньше единицы, проведённые работы положительно отразились на безопасности движения. Исследования на федеральных дорогах Алтайского края показали, что после капитального ремонта с расширением проезжей части, устройством разделительной полосы и ликвидацией левоповоротных движений наблюдается устойчивое снижение числа учётных ДТП [2, с. 58–61].

В Республике Беларусь вопросы оценки аварийности и прогнозирования эффективности мероприятий по её снижению получили развитие в работах белорусских исследователей. Учебно-методическое пособие Д. В. Капского и С. В. Скирковского «Аварийность в дорожном движении», изданное Белорусским государственным университетом транспорта в 2024 году, раскрывает сущность аварийных издержек, излагает методы анализа зависимости аварийности от различных факторов, включая дорожные условия, и приводит методы прогнозирования аварийности [3, с. 12–15]. В пособии детально рассматриваются статистический анализ, инженерный анализ, топографический и очаговый анализ, а также методы линейных графиков коэффициентов аварийности и безопасности [3, с. 87–92].

Особого внимания заслуживает метод конфликтных ситуаций, предложенный К. Хайденом и развиваемый белорусскими учёными. Данный метод основан на существовании статистической зависимости между количеством аварий и количеством конфликтных ситуаций, что позволяет прогнозировать аварийность на конфликтных объектах. Совершенствование метода происходит по направлениям учёта степени опасности конфликтных ситуаций, тяжести последствий аварий и нелинейной функции пересчёта числа приведённых конфликтных ситуаций. Однако метод имеет ограничения, связанные со сложностью обнаружения и идентификации конфликтных ситуаций, что требует специальной подготовки специалистов.

Метод коэффициентов аварийности, широко применяемый при проектировании и реконструкции дорог, основан на перемножении частных коэффициентов, учитывающих влияние различных факторов: интенсивности движения, ширины проезжей части и обочин, продольного уклона, расстояния видимости и др.

При реконструкции дорог рекомендуется предусматривать перестройку участков с итоговым коэффициентом аварийности более 25–40 в зависимости от местных условий. При проектировании новых дорог целесообразно перепроектировать участки, для которых итоговый коэффициент аварийности превышает 15–20. Данный метод, несмотря на ряд недостатков, связанных с упрощённым учётом взаимосвязи факторов, остаётся востребованным инструментом при обосновании мероприятий капитального ремонта.

Современные подходы к оценке эффективности капитального ремонта всё чаще учитывают безопасность как отдельную цель оптимизации. Исследования показывают, что включение аварийности в процесс планирования ремонтных работ позволяет достичь снижения частоты ДТП, хотя и требует дополнительных затрат. Такой подход позволяет обоснованно определять объёмы финансирования, необходимые для достижения целевых показателей безопасности.

Белорусский опыт капитального ремонта дорог демонстрирует комплексный подход к повышению безопасности движения. На трассе Р-122 на участке Могилёв – Чаусы реализуется масштабный проект реконструкции, включающий расширение проезжей части вдвое, строительство трёх новых мостов, транспортного тоннеля, подземных пешеходных переходов и биопереходов для диких животных. Внедряется система «умных светофоров», способных автоматически переключать сигналы в зависимости от появления транспорта на второстепенной дороге. После модернизации среднесуточный поток вырастет с 3,6 до 9 тысяч машин, а в перспективе на 20 лет – до 15 тысяч. Данный проект иллюстрирует интеграцию мер по повышению пропускной способности и безопасности движения в рамках капитального ремонта.

В Брестской области на трассе М-1/Е30 в декабре 2025 года введён в эксплуатацию самый протяжённый в Беларуси участок контроля средней скорости движения протяжённостью 25 километров. Выбор места был обусловлен тем, что за последние пять лет на этом отрезке произошло 24 ДТП, в которых погибли 15 человек и ещё 30 получили травмы. В регионе также активно используются беспилотные летательные аппараты, стационарные и мобильные датчики скорости, автоматические системы фиксации нарушений. Эти меры дополняют капитальный ремонт дорожной инфраструктуры и усиливают его эффект в части снижения аварийности.

Статистика дорожной аварийности в Беларуси демонстрирует положительные тенденции. По предварительным данным, в 2025 году общее число ДТП снизилось на 6 %, число аварий с пострадавшими – на 9 %, количество погибших уменьшилось с 434 до 417 человек. Эти показатели отражают комплексное воздействие мер по повышению безопасности дорожного движения, включая улучшение дорожной инфраструктуры.

Практические рекомендации по повышению эффективности капитального ремонта с точки зрения снижения аварийности включают: учёт безопасности как самостоятельного критерия при планировании ремонтных программ; применение методов оценки, учитывающих нелинейное поведение грунтов и реальное увеличение жёсткости дорожной конструкции; использование современных технических средств контроля скоростного режима на участках концентрации ДТП; внедрение интеллектуальных транспортных систем и «умных» светофоров; комплексный подход, включающий не только восстановление дорожной одежды, но и обустройство дороги элементами безопасности. Для условий Беларуси целесообразно развитие национальной методики оценки влияния капитального ремонта на аварийность с учётом отечественного опыта и адаптацией зарубежных подходов.

Капитальный ремонт автомобильных дорог является эффективным инструментом снижения аварийности. Методы оценки влияния дорожно-строительных работ на безопасность движения включают коэффициент изменения аварийности, метод коэффициентов аварийности, метод конфликтных ситуаций и многоцелевую оптимизацию.

Белорусский опыт демонстрирует комплексный подход к капитальному ремонту, сочетающий улучшение транспортно-эксплуатационных характеристик дорог с мерами по повышению безопасности движения. Дальнейшее развитие методов оценки и повышения эффективности капитального ремонта должно учитывать современные достижения в области прогнозирования аварийности и интеллектуальных транспортных систем.

Список литературы

1 **Капский, Д. В.** Аварийность в дорожном движении : учеб.-метод. пособие / Д. В. Капский, С. В. Скирковский. – Гомель : БелГУТ, 2024. – 155 с.

2 **Ходоскин, Д. П.** Топографический анализ аварийности в г. Минске в разрезе дорожно-транспортной аварийности с участием маршрутных транспортных средств / Д. П. Ходоскин, О. А. Довгулевич, А. В. Морозова // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 2. – С. 66–71.

3 **Скирковский, С. В.** Развитие теории конфликтных ситуаций / С. В. Скирковский, Д. В. Капский // Тихомировские чтения : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 10–11 дек. 2020 г. – Гомель : БелГУТ, 2021. – С. 339–341.

УДК 528.01/.06

КОМПЛЕКС ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ПРОКЛАДКЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Н. С. СЫРОВА, И. П. ДРАЛОВА, М. Ю. НИКИТЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Волоконно-оптические линии являются критически важным элементом транспортной инфраструктуры для Белорусской железной дороги, так как связаны с безопасностью, управлением движением поезда, обслуживанием пассажиров и в целом с эффективностью работы всего железнодорожного транспорта. Комплекс высокоточных полевых измерений и вычислений, обеспечивающих долговечность таких линии, создается благодаря опорной геодезической сети вдоль всей трассы с минимальной шириной охранной зоны два метра с каждой стороны, для дальнейшего нанесения на топографические планы и использования юридической чистоты объекта.

Эффективной практикой выполнения работ является сочетание беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и GNSS-оборудования. Их совместное использование позволяет получать результаты быстро, безопасно и с высокой детализацией данных [1]. Геодезическое сопровождение является необходимой частью для принятия проектных решений.

Инженерно-геодезические изыскания на местности выполнялись вдоль железнодорожного участка Жабинка – Минск. Целью являлась съемка территории для построения цифровой модели местности (ЦММ) и составления топографического плана, для принятия проектных решений по возведению новой волоконно-оптической линии связи.

Перед началом работ изыскания регистрировались в органах архитектуры и градостроительства с последующим получением задания. Участок был разбит на фрагменты, после анализа характера местности и интерактивной карты запретных зон для полётов БПЛА была составлена программа изысканий, в которой разграничивались области, подлежащие съемке с применением БПЛА и геодезической спутниковой аппаратуры (EFT M4 GNSS) в комплексе, и области, снимаемые только с использованием геодезической спутниковой аппаратуры.

Там, где использование БПЛА вместе с геодезической спутниковой аппаратурой было невозможно (запретные зоны для полётов) или нецелесообразно (местность, сильно заросшая высокотравьем, кустарниками, лесопосадками), полевые работы производились только геодезической спутниковой аппаратурой.

В этом случае были задействованы два человека. Анализируя объекты местности, характерные точки рельефа и ситуацию, с помощью геодезической спутниковой аппаратуры в режиме реального времени (RTK) записывали точки с соответствующим описанием (номер точки, положение в пространстве). За один рабочий день получилось оцифровать приблизительно 8–10 гектаров местности незастроенной территории, на застроенных территориях темп производства работ снижался до 4–5 гектаров и даже меньше, в зависимости от густоты обследуемых наземных и подземных инженерных сетей. Геодезические работы лежат в основе эксплуатации и обслуживания на протяжении всего жизненного цикла объекта.

Для местности, где применяли БПЛА с геодезической спутниковой аппаратурой, были задействованы четыре человека: один оператор БПЛА (должен иметь соответствующую квалификацию и разрешение); один человек с геодезической спутниковой аппаратурой, который перед полётом БПЛА закреплял на местности опорные связующие точки-маркеры (кружки контрастного цвета на поверхности шпал, бордюров, асфальтном покрытии) и записывал соответствующие съёмочные точки. Все измеренные величины необходимы для корректной обработки данных и получения плотного облака точек ЦММ при помощи методов фотограмметрии. Два человека с геодезической спутниковой аппаратурой производили съемку точек, недоступных для обработки плотного облака точек и ортофотопланов (кабельные сторожки, смотровые колодцы инженерных сетей, искусственные сооружения). В процессе работы велась фотосъемка для получения полной картины местности.

Обработка данных велась алгоритмизировано:

– объединение снимков, создание плотного облака точек и текстурированной 3D-модели;

– фильтрация избыточных измерений и сортировка: разделение точек на землю, растительность, линейные и площадные объекты;

– уравнивание результатов: приведение всех данных к эталонным значениям, нахождение невязок, введение поправок.

Создание ЦММ включало следующие этапы:

– векторизация и структурирование объектов;

– создание цифровой модели рельефа (ЦМР) – построение триангуляционной поверхности (каркаса, TIN-модели), рельефа в виде градиента и горизонталей;

– создание цифровой модели контуров (ЦМК) – оцифровка ситуации (объектов) с использованием семантических библиотек, с присвоением атрибутивных свойств примитивам;

– формирование итоговой ЦММ, сбор всех компонентов в единую систему;

– наложение текстур;

– интеграция слоев: объединение рельефа, растительности и всех площадных и линейных объектов в одно целое.

Весь комплекс выполнялся с полным соблюдением нормативных документов и методик, нарушения недопустимы в полевых условиях. Грамотное их сочетание является современным стандартом надежности и качества [2]. После получения всех необходимых данных был сформирован пакет исполнительной документации для кадастрового учета и сдачи объекта.

Геодезическое сопровождение при проектировании, строительстве и эксплуатации является необходимым видом работ, благодаря которому оптические технологии могут обеспечить увеличение скорости передачи информации, снизить стоимость доступа к сети и, следовательно, увеличить число пользователей.

Список литературы

1 Инженерная геодезия и фотограмметрия : учеб.-метод. пособие / Е. К. Атрошко, И. П. Дралова, Г. М. Куновская, Н. С. Сырова. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 100 с.

2 **Атрошко, Е. К.** Прикладная геодезия и современные инженерно-геодезические технологии : учеб.-метод. пособие / Е. К. Атрошко, И. П. Дралова, Н. С. Сырова. – Гомель : БелГУТ, 2023. – 97 с.

УДК 539.3

ОБ ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ ЗА ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ «БЕЛОРУССКАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА»

Д. М. УГРИН

Центр диагностики объектов инфраструктуры государственного объединения «Белорусская железная дорога», г. Минск

Важнейшим фактором, влияющим на безопасность движения поездов, является своевременная и достоверная диагностика состояния объектов инфраструктуры. Безопасность движения поездов требует строго регламентированного контроля за состоянием объектов инфраструктуры, который возможно осуществить с помощью современных средств диагностики. Контроль за состоянием объектов инфраструктуры – это непрерывный процесс, при реализации которого определяется актуальное техническое состояние объектов инфраструктуры, а также изменение этого состояния во времени.

С целью повышения эффективности использования средств технической диагностики, качества и достоверности результатов контроля технического состояния объектов инфраструктуры Белорусской железной дороги приказом от 11.07.2017 № 213Н «О создании обособленного структурного подразделения (филиала) государственного объединения «Белорусская железная дорога» с 01.10.2017 создан Центр диагностики объектов инфраструктуры государственного объединения «Белорусская железная дорога» (далее – Центр диагностики).

Основная задача Центра диагностики заключается в проведении диагностики и анализе состояния объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, включающем: обеспечение контроля

геометрии рельсовой колеи, дефектоскопию рельсов, метрологическую оценку средств диагностики, видеоконтроль объектов инфраструктуры, оценку состояния балластного слоя и земляного полотна, обследование искусственных сооружений, обследование габаритного состояния и контроль за соблюдением габарита приближения строений, измерение и контроль параметров устройств автоматики, телемеханики, поездной радиосвязи и контактной сети.

Целями диагностики объектов инфраструктуры является:

– определение технического состояния отдельных элементов объектов инфраструктуры;

– определение необходимого объема работ по содержанию и ремонту объектов инфраструктуры, а также приоритетности их выполнения на основании установленного технического состояния;

– осуществление принципа эксплуатации инфраструктуры в зависимости от ее технического состояния;

– обеспечение быстрого, экономически обоснованного реагирования на происходящие процессы, приводящие к изменению режимов работы и отказу элементов инфраструктуры;

– комплексное наблюдение за естественным расстройством элементов инфраструктуры за весь срок службы конструкций, выявление причин возникновения преждевременных деформаций, превышающих допускаемые нормы;

– прогнозирование состояния объектов инфраструктуры согласно результатам диагностики;

– внесение предложений по изменению технических условий, норм и требований по содержанию объектов инфраструктуры на основании результатов диагностики;

– предотвращение событий и аварийных ситуаций путем непосредственного представления информации о результатах диагностики.

В состав Центра диагностики входят следующие структурные подразделения: дорожная лаборатория дефектоскопии, дорожная мостоиспытательная станция, дорожная габаритообследовательская станция, отдел путевых измерений, отдел неразрушающего контроля, отдел диагностики автоматики, телемеханики, связи и контактной сети, отдел организации эксплуатации средств технической диагностики, диагностический комплекс инфраструктуры, три вагона-путеизмерителя, три вагона-дефектоскопа.

УДК 625.7/.8

ПРИМЕНЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИРКУЛЯРНОЙ ЭКОНОМИКИ

Т. М. ФРОЛОВА, П. А. ЛИСТРАТЕНКО, П. В. ПОФТАЛЬНЫЙ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Экономика замкнутого цикла, или циркулярная экономика, представляет собой экономическую модель, направленную на обеспечение экономического роста за счет перехода от истощающего к регенеративному использованию природных ресурсов [1]. Ключевое отличие циркулярной экономики от традиционной линейной модели («добывай, производи, выбрасывай») состоит в трансформации базового принципа в формулу «добывай, производи, повторно используй» [2].

В контексте дорожного хозяйства применение принципов циркулярной экономики означает максимальное вовлечение вторичных материальных ресурсов в производственные процессы, продление жизненного цикла дорожно-строительных материалов и конструкций, а также минимизацию образования отходов на всех этапах: от производства материалов до эксплуатации и ремонта дорог.

Создание диаграммы Исикавы для повышения долговечности дорожной одежды в условиях экономики замкнутого цикла позволит выявить ключевые проблемы и возможности для их решения. Это необходимо для разработки более эффективных стратегий повышения качества и долговечности дорожной инфраструктуры в целях устойчивого развития и снижения негативного воздействия на окружающую среду. Диаграмма Исикавы для определения проблем при повышении долговечности дорожных одежд с учетом принципов экономики замкнутого цикла представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Диаграмма Исикавы повышения долговечности дорожных одежд на основе принципов экономики замкнутого цикла

В Республике Беларусь сформирована комплексная нормативно-правовая база, создающая условия для внедрения принципов циркулярной экономики в дорожное хозяйство. Существующие технические кодексы и стандарты допускают применение вторичных материалов (асфальтогранулята, щебеночно-гравийно-песчаных смесей с добавлением вторичного сырья) в конструкциях дорожных одежд и других конструктивных элементах дорог.

Асфальтобетонный гранулят представляет собой сыпучий минеральный материал, получаемый в процессе фрезерования старых асфальтобетонных покрытий. Асфальтогранулят является одним из наиболее массовых отходов, ежегодно образующихся при работе дорожно-строительных предприятий. Согласно СТБ 1705, асфальтогранулят подразделяется на три типа в зависимости от крупности зёрен: А1 (от 0,05 до 40 мм), А2 (от 0,05 до 20 мм), А3 (от 0,05 до 10 мм) [3]. Для приготовления асфальтобетонных смесей по СТБ 1033 применяется активный асфальтогранулят типов Аг 20 и Аг 10 [4]. В настоящее время асфальтогранулят используется по следующим направлениям: приготовление асфальтобетонных смесей; устройство щебеночных оснований методом заклинки; производство строительных материалов. При этом использование асфальтогранулята сопряжено с рисками ограниченного количества дробильно-сортировочных установок, позволяющих получать кондиционный материал. Кроме того, при введении асфальтогранулята в горячие смеси требуется повышение температуры нагрева каменных материалов (до 221 °С при 20 % содержания), что создаёт риск «парового удара» и ускоренного износа оборудования.

Золошлаковые материалы (ЗШМ) образуются при сжигании угля на тепловых электростанциях. В Республике Беларусь основным источником ЗШМ являются тепловые электростанции (ТЭЦ), работающие на твёрдом топливе. Перспективным направлением является использование ЗШМ для устройства насыпей земляного полотна и в конструктивных слоях дорожных одежд, что подтверждается опытом строительства крупных инфраструктурных объектов.

Резиновая крошка – результат переработки изношенных автомобильных шин. Основное направление применения резиновой крошки в дорожном строительстве – модификация битума для производства полимер-битумных вяжущих (ПБВ), что повышает сдвигоустойчивость, трещиностойкость и морозостойкость асфальтобетонных покрытий [5]. Разработка гранулированного резинобитумного вяжущего (ГРБВ) позволяет получать стабильный модификатор, пригодный для использования на стандартном асфальтобетонном оборудовании [6].

Полимерные отходы (переработанный пластик, полимерные волокна) могут использоваться в двух направлениях: как модификаторы битума (частичная или полная замена первичных полимеров) и как армирующие добавки. Дисперсное армирование полимерными волокнами упрочняет структуру покрытия по всему объёму, что значительно эффективнее локального армирования сетками. В Республике Беларусь разработки в области полимерных модификаторов асфальтобетона ведутся ЦНИИ ДСГМ БНТУ, что подтверждается Евразийским патентом № 017056.

Технологии повышения долговечности дорожных одежд с использованием вторичного сырья имеют целевую направленность на одновременное решение двух задач: увеличение межремонтных сроков службы дорожных конструкций и вовлечение в хозяйственный оборот отходов производства и потребления. В условиях Республики Беларусь данные технологии приобретают особую актуальность в связи с необходимостью снижения материалоёмкости дорожных работ при сохранении требуемого уровня надёжности и безопасности дорожного движения.

Для эффективного внедрения этих решений необходима система прогнозирования долговечности конструкций с использованием вторичных материалов, учитывающая специфические условия Республики Беларусь. Наиболее эффективным в этом направлении представляется механико-эмпирический подход, реализованный в AASHTOWare Pavement ME Design и объединяющий расчёт напряжённо-деформированного состояния с калиброванными передаточными функциями повреждений. Он позволяет количественно оценить влияние вторичных материалов на долговечность конструкции и создаёт методологическую основу для научно обоснованного внедрения вторичных ресурсов в дорожное строительство в рамках экономики замкнутого цикла.

Список литературы

1 **Kirchherr, J.** Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions / J. Kirchherr, D. Reike, M. Hekkert // Resources, Conservation and Recycling. – 2017. – Vol. 127. – P. 221–232.

2 **Geissdoerfer, M.** The Circular Economy – A new sustainability paradigm? / M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. Bocken, E. Hultink // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 143. – P. 757–768.

3 СТБ 1705-20015. Асфальтогранулят для транспортного строительства. Технические условия. – Введ. 01.03.2016. – Минск : Госстандарт, 2017. – 14 с.

4 СТБ 1033-2016. Смеси асфальтобетонные, дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия. – Введ. 01.01.2017. – Минск : Госстандарт, 2017. – 58 с.

5 **Бусел, А. В.** Опыт применения резинобитумного вяжущего в дорожном строительстве Республики Беларусь / А. В. Бусел // Автомобильные дороги и мосты. – 2023. – № 2. – С. 12–18.

6 Гранулированное резинобитумное вяжущее // БелдорНИИ. – URL: https://beldornii.by/ developments/asfaltobeton/ granulirovannoe-rezinobitumnoe-vyazhushchee/ (дата обращения: 01.09.2026).

УДК 625.7/.8

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

И. М. ЦАРЕНКОВА, И. Ю. КОВАЛЕВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Качественное обслуживание автомобильных дорог в зимний период служит гарантией бесперебойной транспортной связи и безопасности перевозок на протяжении всего года. В зимний период снежно-ледяные отложения, ухудшение сцепления с покрытием и деформации дорожного полотна, вызванные морозами и активным использованием противогололёдных смесей, являются самыми распространенными проблемами. Традиционные подходы к устранению гололёда и локальных повреждений часто носят экстренный характер, что негативно сказывается на долговечности покрытия и приводит к перерасходу материалов. Учитывая рост трафика и ужесточение нормативов по срокам между ремонтами, возрастает потребность в системном улучшении технологий зимнего содержания дорог.

Ежегодно эксплуатирующие дорожные организации в целях своевременной и качественной подготовки дорог, искусственных сооружений на них разрабатывают комплекс мероприятий по обеспечению бесперебойного и безопасного движения по автомобильным дорогам в зимний период, включающий защиту от снежных заносов, устранение зимней скользкости и очистку автомобильных дорог от снега. Практический опыт эксплуатации дорог в зимний период показывает, что ключевыми задачами являются механизированная уборка снежного покрова, нанесение сухих фрикционных и жидких хлоридных противогололёдных средств, а также оперативный ремонт дефектов покрытия (выбоин, сколов), провоцируемых морозными трещинами и циклами замораживания-оттаивания. При этом применение твёрдых реагентов лимитируется температурным режимом:

при снижении температуры окружающего воздуха ниже –15 °С эффективность солей резко падает, что вынуждает использовать смешанные составы. Коррозия металлической арматуры и деградация битумных компонентов в асфальтобетоне способствуют сокращению срока службы покрытия. Одной из причин данного дефекта является применение жидких реагентов.

Остро стоит проблема ликвидации критической ямочности на асфальтобетонных покрытиях в зимний период. Применение горячих асфальтобетонных смесей в зимний период является технологическим нарушением. Холодные и литые асфальтобетонные смеси с увеличенным содержанием битума могут использоваться, но при условии наличия в их составе полимерных компонентов [2, 5]. Опыт белорусских дорожных служб показывает, что около 80 % межсезонных выбоин устраняется струйно-инъекционным способом с катионными эмульсиями, однако при длительных устойчивых морозах данный метод не обеспечивает необходимой адгезии [1]. Наиболее широко в настоящее время применяются складируемые органоминеральные смеси.

Организационные проблемы эксплуатации автомобильных дорог в зимний период саккумулированы в отдельном актуальном блоке: несвоевременное оперативное реагирование с принятием мер при ухудшении погодных условий, несогласованность действий метеорологических служб и подрядчиков, значительная изношенность специализированной техники из-за воздействия агрессивных химических составов, расчет дозировки противогололёдных материалов без учета температуры асфальтобетонного покрытия в режиме реального времени. Остро стоит проблема утилизации снега после уборки: отсутствие повсеместного внедрения стационарных пунктов плавления увеличивает негативное воздействие на экосистему почв и водоёмов. В то же время хороший результат показывает применение твёрдых реагентов с антикоррозийными добавками и использование автоматизированной системы навигации ГЛОНАСС/GPS для точного распределения веществ, что позволяет сократить потребление солей на 15–20 % [3, 4].

Аналитические данные показывают, что в среднем на территории Гомельской области за зимний период число случаев выпадения осадков и перехода температур через 0 °С достигает 59 и 79 раз соответственно. При этом в комплексе работ по зимнему содержанию приоритет отдается профилактическим обработкам. Применение превентивного метода обработки позволяет снизить аварийность в условиях гололёда на 25–30 % и сократить расход химических реагентов на 18–22 % [4]. Во время больших снегопадов выполняется снегоочистка и комплексные работы по ликвидации зимней скользкости. При решении технологических проблем превентивная обработка покрытий способствует повышению эффективности системы зимнего содержания. В ее основу заложены результаты краткосрочных метеорологических прогнозов, получаемые с шагом до одного часа.

В настоящее время на автомобильных дорогах Республики Беларусь для профилактической обработки и ликвидации зимней скользкости применяются химико-фрикционный и фрикционный способы борьбы с зимней скользкостью. Штабеля с противогололедными материалами хранятся на открытых площадках с асфальтобетонным покрытием и укрываются водонепроницаемым материалом; галит, обработанный антислеживателем, хранится в ангарах. Состав противогололедных материалов регламентируется СТБ 1158-2013 «Материалы противогололедные для зимнего содержания автомобильных дорог. Общие технические условия». Наиболее распространены составы ПГМ-ХФ-50 и ПГМ-ХФ-5. К наиболее широко распространенным традиционным реагентам относятся хлорид натрия (NaCl), хлорид кальция ($CaCl_2$) и хлорид магния ($MgCl_2$). Отмечается, что хлориды обладают высокой коррозионной активностью и приводят к ускоренному физическому износу металлических и бетонных элементов автодорог, а также оказывают негативное влияние на окружающую среду. Для снижения потерь от применения традиционных ПГМ могут использоваться инновационные реагенты, имеющие в своем составе менее агрессивные химические вещества, например формиат натрия (HCOONa), ацетат калия (CH3COOK), ацетат кальция-магния (CMA) [5]. При этом использование жидких противогололёдных составов с низкой температурой кристаллизации (до –25 °С), а также комбинированных реагентов с добавлением гранитного отсева для улучшения сцепления позволяет снизить агрессивное воздействие соли на асфальтобетон. Для ликвидации низкотемпературных трещин рекомендуется применение специальных герметиков на резинобитумной основе, сохраняющих эластичность в мороз [6].

В организационном плане рекомендуется отказаться от диспетчерского подхода в пользу зонально-маршрутного планирования. В рамках этой модели дорожная сеть сегментируется на участки, которые ранжируются по степени важности (возможные критерии: высокая интенсивность дви-

жения, участки с ограниченной пропускной способностью, мосты и др.), при этом для каждой зоны устанавливаются собственные регламенты обработки и нормативы времени прибытия. Важнейшим компонентом становится внедрение автоматизированной системы контроля состояния покрытия, функционирующей на основе данных дорожных метеостанций и датчиков температуры, установленных на спецтехнике. Создаваемая цифровая платформа даёт возможность составлять карты рисков возникновения гололёда с прогнозом на 2–6 часов вперёд и гибко перераспределять ресурсы между районами. Места размещения производственно-технологических площадок для хранения и приготовления противогололедных материалов в непосредственной близости к обслуживаемым участкам дорог оптимизируются на основе минимизации холостых пробегов и повышения оперативности выполнения работ по зимнему содержанию.

Таким образом, гарантировать безопасность и комфорт передвижения в экстремальных погодных условиях возможно лишь при интеграции современных морозоустойчивых материалов, интеллектуальных систем прогнозирования, эффективной логистики и жёсткого контроля качества.

Список литературы

1 **Сазонов, А. В.** Струйно-инъекционный метод ремонта асфальтобетонных покрытий / А. В. Сазонов, И. М. Шведовский // Автомобильные дороги и мосты. – 2024. – № 1 (33). – С. 27–35.

2 Каким методом делается ямочный ремонт дорог, рассказали в «Брестоблдорстрое» // БелТА. – 2026. – URL: https://belta.by/society/view/kakim-metodom-delaetsja-jamochnyj-remont-dorog-rasskazali-v-brestobldorstroe-794907-2026/. – (дата обращения: 03.09.2026).

3 Без выбоин и трещин. Какие новшества предлагают в Беларуси для ремонта дорог // БелТА. – 2025. – URL: https://belta.by/society/view/bez-vyboin-i-treschin-kakie-novshestva-predlagajut-v-belarusi-dlja-remonta-dorog-706924-2025/. – (дата обращения: 03.09.2026).

4 Узнали, как развивается транспортная отрасль Беларуси // СБ. Беларусь сегодня. – 2024. – URL: https://www.sb.by/articles/vezti-i-dovezti.html (дата обращения: 03.09.2026).

5 **Попов, Н. А.** Совершенствование механизмов управления дорожным обслуживанием в российской федерации / Н. А. Попов // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2020. – № 11 (3). – С. 304–315.

6 Защитные слои, литой асфальтобетон. Какие технологии применяют при ремонте дорог в Минске // БЕЛТА. – 2025. – URL: https://belta.by/regions/view/zaschitnye-sloi-litoj-asfaltobeton-kakie-tehnologii-primenjajut-pri-remonte-dorog-v-minske-726505-2025/ (дата обращения: 03.09.2026).

УДК 625.7/.8

АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

И. М. ЦАРЕНКОВА, П. В. ПОФТАЛЬНЫЙ, Т. М. ФРОЛОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Аналитическая проработка теоретических и практических аспектов эколого-экономической оптимизации технологий устройства дорожных одежд применительно к условиям Республики Беларусь на современном этапе является актуальным вызовом устоявшимся технологическим подходам. Наличие современной нормативно-правовой базы, методики определения критерия выбора оптимальных материалов и технологических процессов в конкретных производственных условиях, а также перспективные направления совершенствования дорожного хозяйства в контексте устойчивого развития и циркулярной экономики – всё должно быть учтено в процессе проработки альтернативных вариантов.

Современное дорожное строительство в Республике Беларусь сталкивается с комплексом взаимосвязанных проблем: необходимостью обеспечения надежности и долговечности дорожных конструкций, ограниченностью природных ресурсов, ростом требований к экологической безопасности и необходимостью экономической эффективности на всех этапах жизненного цикла. В этих условиях эколого-экономическая оптимизация технологии устройства дорожных одежд становится приоритетным направлением научных исследований и практической деятельности.

Основополагающим документом в области проектирования нежестких дорожных одежд является ТКП 697-2026 (33200) «Автомобильные дороги общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования», который введен в действие с 25 мая 2026 года постановлением

Минтранса от 27.03.2026 № 9 [1]. Данный технический кодекс установившейся практики распространяется на нежесткие дорожные одежды автомобильных дорог общего пользования и устанавливает правила их проектирования при возведении (строительстве), реконструкции и ремонте. В 2026 году также введен в действие ТКП 698-2026 «Автомобильные дороги общего пользования. Жесткие и полужесткие дорожные одежды. Правила проектирования» [2]. С 1 июля 2025 года введены в действие обновленные строительные правила СП 3.03.08-2025 «Дорожные одежды улиц населенных пунктов», которые объединили методики расчета как нежесткого, так и жесткого типа дорожной одежды [3].

Результаты исследований многих ученых в области проектирования дорожных одежд позволяет сделать вывод о том, что основным техническим критерием допустимости применения материала в конструктивном слое является равнопрочность конструкций дорожных одежд или отдельных конструктивных слоев, устраиваемых из различных материалов [4]. Согласно исследованиям ученых Белорусского национального технического университета, применение принципа эквивалентности систем позволяет заменять отдельные конструктивные слои, устраиваемые из определенных материалов, эквивалентными по жесткости слоями из других материалов, увеличивая или уменьшая их толщину в зависимости от прочностных характеристик. Знание расчетных модулей деформации сравниваемых материалов и межремонтных сроков для каждого варианта позволяет более полно выявить технико-экономические особенности конструктивных решений.

Экономическая целесообразность использования того или иного материала может быть записана в виде неравенства, сопоставляющего дисконтированные затраты на строительство и эксплуатацию. Важным аспектом является учет затрат на всех этапах жизненного цикла дорожной одежды. Срок службы дорожной одежды в соответствии с нормативными документами составляет от 2 лет для грунтовых автомобильных дорог до 25 лет для дорог с капитальным типом покрытия. При этом дорожные одежды с цементобетонным покрытием имеют в среднем в 1,5–2 раза более продолжительный срок службы по сравнению с другими типами.

Экологическая составляющая выбора материалов включает минимизацию использования невозобновляемых ресурсов (применение местных материалов взамен привозных), снижение энергоемкости производства и применения материалов, вовлечение вторичных ресурсов и отходов производства в дорожное строительство. Согласно «Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь до 2040 года», ставится задача удержать образование отходов на уровне 0,40 кг/руб. ВВП и довести уровень использования твердых коммунальных отходов до 90 % [5].

Научные исследования и производственный опыт дорожных организаций Республики Беларусь указывают на принципиальную возможность широкого использования местных дорожно-строительных материалов при строительстве экономичных и долговечных дорожных одежд. В составе более половины местных грунтов Республики Беларусь преобладают глинистые частицы, что требует разработки специальных методов их укрепления и стабилизации. Стоимость дорожной одежды при использовании местных материалов может снижаться в 2–3 раза.

Применение эмульсионно-минеральных смесей (ЭМС) для устройства конструктивных слоев дорожных одежд положительно зарекомендовало себя в отечественной дорожной отрасли. Устроенные участки покрытий с применением ЭМС служат на автомобильных дорогах местной сети уже более 10 лет. Основными преимуществами технологии являются меньшая по сравнению с горячими смесями стоимость, неприхотливость в применении, большая вариативность в отношении минеральных материалов. Применение ЭМС позволяет снизить общую стоимость работ на 20 % за счет уменьшения технологических энергозатрат и удешевления конструкции, повысить экологическую безопасность в зоне приготовления и укладки смеси. В настоящее время внедрена современная технология устройства покрытий из ЭМС, структурированных волокнистыми добавками.

Технология холодного ресайклинга является перспективной для восстановления дорожных одежд. Холодные регенерированные смеси приготавливаются с помощью дорожной машины RM-500 и укладываются в конструктивные слои дорожной одежды в холодном состоянии. Технология позволяет эффективно использовать материал старого покрытия, снижая потребность в новых материалах и уменьшая объем отходов. Использование геосинтетических материалов позволяет снизить объемы земляных работ на 20–25 %, повысить несущую способность грунтов земляного полотна и сопротивление покрытия усталостному трещинообразованию.

В дорожном строительстве Республики Беларусь все более широкое применение находят вторичные материалы: асфальтогранулят (асфальтобетон от разборки покрытий относится к неопас-

ным отходам и вторичным материальным ресурсам), вторичный щебень из лома бетона и железобетона, резиновая крошка из отработанных автомобильных шин для модификации битумных вяжущих (гарантийный срок эксплуатации дорог с таким модификатором составляет 10 лет), шлаковые щебень и песок.

Таким образом, эколого-экономическая оптимизация технологии устройства дорожных одежд в Республике Беларусь является актуальным направлением, интегрирующим технические, экономические и экологические аспекты дорожного строительства. Ключевыми направлениями оптимизации являются применение местных материалов на основе критерия равнопрочности и экономической целесообразности, внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий (ЭМС, холодный ресайклинг), использование геосинтетических материалов, вовлечение вторичных ресурсов и отходов. Методика оптимизации активизирует комплексные процессы выбора наиболее эффективного варианта конструктивного решения и технологии его реализации. Оценке подлежат первоначальные инвестиции и дисконтированные затраты на протяжении расчетного периода, определяемого долговечностью предлагаемых вариантов и целесообразными величинами межремонтных сроков. Экономическая оценка экологических последствий является неотъемлемой частью реализации методики оптимизации в связи со значительным удельным весом экологических факторов в комплексном процессе проведения дорожных работ и эксплуатации транспортных средств.

Список литературы

1 ТКП 697-2026 (33200). Автомобильные дороги общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. – Введ. 27.03.2026. – Минск : М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, 2026. – 91 с.

2 ТКП 698-2026 (33200). Автомобильные дороги общего пользования. Жесткие и полужесткие дорожные одежды. Правила проектирования. – Введ. 27.03.2026. – Минск : М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, 2026.

3 СП 3.03.08-2025. Дорожные одежды улиц населенных пунктов. – Введ. 01.07.2025. – Минск, 2025. – 86 с.

4 **Ковалев, Я. Н.** Технико-экономическое сравнение конструкций дорожных одежд с использованием местных материалов / Я. Н. Ковалев, А. В. Савуха, В. В. Гиринский // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 5. – С. 449–454.

5 Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь до 2040 года // Министерство экономики Респ. Беларусь. – URL: https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR/natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-razvitija-respubliki-belarus-na-period-do-2040-goda.pdf (дата обращения: 18.09.2026).

УДК 624.042:625.41

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АНКЕРНЫХ УЗЛОВ РЕЛЬСО-СТРУННЫХ ЭСТАКАД uST ПРИ ПРОГРЕССИРУЮЩЕМ ЛОКАЛЬНОМ ПОВРЕЖДЕНИИ

Ю. А. ШЕБЗУХОВ, В. Н. ГАРАНИН
ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Республика Беларусь

Анкерные узлы рельсо-струнных эстакад относятся к ответственным элементам транспортных комплексов uST. Их долговечность зависит не только от величины действующих усилий, но и от изменения состояния отдельных конструктивных элементов в процессе эксплуатации. Для рельсо-струнного транспорта существенными являются нагрузки от путевой структуры и транспортного средства, температурные воздействия, ветер, а также циклическое нагружение, связанное с движением подвижного состава. Расчётные исследования элементов рельсо-струнной путевой структуры показывают необходимость комплексного рассмотрения этих воздействий при оценке напряжённо-деформированного состояния и долговечности конструкций [1, 2]. В работе [3] рассматривается задача повышения долговечности анкерных узлов с учётом коррозионных процессов, усталостного разрушения и вибрационных воздействий. Показано, что для такого узла недостаточно оценивать только исходное напряжённо-деформированное состояние: необходимо учитывать изменение геометрии и свойств элементов в процессе эксплуатации.

В случае, когда накопившееся повреждение начинает существенно влиять на работоспособность узла, изменение технического состояния конструкции зависит от развития локального повреждения. Локальная коррозионная потеря сечения может быть сравнительно небольшой по отношению к общей массе элемента, но при расположении в зоне концентрации напряжений она способна приве-

сти к заметному изменению напряжённо-деформированного состояния. Дополнительное влияние оказывает циклическое знакопеременное нагружение, которое ускоряет накопление усталостного повреждения в ослабленной зоне. Поэтому при оценке состояния анкерного узла важно рассматривать не только величину повреждения как таковую, но и вызванное им перераспределение внутренних напряжений в конструкции. Например, увеличение локальной потери сечения до определённого значения может практически не менять напряжения в узле, тогда как дальнейшее развитие повреждения приводит к быстрому росту напряжений в соседних элементах.

Расчётный подход к определению предельного технического состояния анкерного узла по изменению его напряжённо-деформированного состояния при прогрессирующем локальном повреждении предполагает построение параметрической конечно-элементной модели анкерного узла, в которой локальное повреждение задаётся с постепенным изменением его размеров и расположения. Для каждого уровня повреждения определяется напряжённо-деформированное состояние конструкции, выявляются наиболее нагруженные элементы и отслеживается изменение запаса прочности и усталостной долговечности.

Это позволяет рассматривать техническое состояние как последовательность переходов от исходного состояния через локальное повреждение, перераспределение напряжений и снижение запаса работоспособности к предельному состоянию.

Предлагается исследовать несколько возможных критериев такого перехода. К ним могут относиться достижение допустимого уровня эквивалентных напряжений, уменьшение расчётной усталостной долговечности ниже заданного значения, исчерпание требуемого запаса несущей способности либо сочетание нескольких показателей. Конкретные значения критических параметров должны быть определены по результатам экспериментального исследования и валидированы в процессе эксплуатации.

Отдельное внимание необходимо уделить расположению повреждения относительно сварных швов, отверстий, переходов сечения и других конструктивных концентраторов напряжений. В этих зонах даже небольшое изменение геометрии может заметно повлиять на локальное напряжённо-деформированное состояние. Поэтому одним из результатов исследования должно стать определение наиболее критичных зон анкерного узла и зависимости предельного состояния от положения локального повреждения.

Перспективным представляется использование полученных расчётных зависимостей для оценки остаточного ресурса. Если для различных уровней повреждения установить изменение напряжений и усталостной долговечности, станет возможным связать фактически измеряемые при обследовании геометрические параметры повреждения с расчётным состоянием конструкции. В дальнейшем это может быть использовано для выбора момента проведения ремонта или замены отдельных элементов.

Такой подход согласуется с общей постановкой задачи обеспечения безопасности транспортно-инфраструктурного комплекса, в которой безопасность рассматривается как совокупность условий и функций, обеспечивающих безопасную эксплуатацию транспортной системы [4]. Для конструктивных элементов это означает необходимость контролировать не только отсутствие видимого разрушения, но и постепенное изменение параметров, от которых зависит их работоспособность.

При этом условия эксплуатации также должны рассматриваться как фактор, влияющий на границу предельного состояния. Исследования применения транспортных комплексов uST в условиях вечной мерзлоты [5] показывают необходимость учитывать особенности внешней среды уже на стадии обоснования конструктивных решений. Для анкерных узлов аналогичный принцип может быть применён к учёту климатических условий, определяющих интенсивность коррозионного повреждения и изменение эксплуатационных характеристик материалов.

Таким образом, предлагаемая методика должна позволить перейти от оценки конструкции по исходным расчётным характеристикам к оценке её состояния в процессе эксплуатации. Основным результатом исследования станет установление зависимости между параметрами локального повреждения и изменением напряжённо-деформированного состояния анкерного узла, а также формирование критерия, позволяющего определить границу его предельного технического состояния, и использование его при обследовании и техническом обслуживании анкерных узлов. В перспективе это позволит сформировать основу для системы оценки технического состояния анкерных узлов рельсо-струнных эстакад uST, объединяющей результаты обследования, расчётные модели и прогноз изменения работоспособности конструкции. Такой подход может быть использован как при разработке новых узлов, так и при оценке состояния конструкций, находящихся в эксплуатации.

Список литературы

1 **Юницкий, А. Э.** Оценка жёсткости гибкого рельса и напряжённо-деформированного состояния элементов рельсо-струнной путевой структуры в центре uSky в Шардже (ОАЭ) / А. Э. Юницкий, А. С. Хлебус, М. И. Цырлин // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8, № 3. – С. 45–62. – DOI: 10.17816/transsyst20228345-62.

2 **Юницкий, А. Э.** Оценка прочности промежуточных опор рельсо-струнной путевой структуры в центре uSky в Шардже (ОАЭ) / А. Э. Юницкий, Р. А. Шаршов, М. И. Цырлин // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9, № 4. – С. 30–45. – DOI: 10.17816/transsyst20239430-45.

3 **Шебзухов, Ю. А.** Повышение долговечности анкерных узлов эстакад транспортных комплексов uST с выработкой технических решений для их проектирования / Ю. А. Шебзухов, В. Н. Гаранин // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. пятилетке качества. В 2 ч. Ч. 1 / Белорус. гос. ун-т трансп. − Гомель, 2025. − С. 352–354.

4 Концепция безопасности движения в струнном транспортном комплексе / А. Э. Юницкий, В. А. Гарах, Т. С. Литвинович, Д. Н. Шевченко // Надёжность. – 2024. – Т. 24, № 2. – С. 61–71. – DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-2-61-71.

5 Применение транспортных комплексов uST в условиях вечной мерзлоты / А. Э. Юницкий, М. И. Цырлин, Р. А. Малахов, А. Н. Петровец // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2025. – Т. 11, № 2. – С. 202–218. – DOI: 10.17816/transsyst683381.

УДК 625.172:625.113

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КРИВЫХ МАЛОГО РАДИУСА

Т. С. ЯКИМЧИК, П. В. КОВТУН, В. А. СОРОГОВЕЦ, А. В. ТЕРЕХ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Железнодорожный транспорт является одним из самых эффективных способов передвижения. Он обеспечивает быстрое и надежное перемещение пассажиров и грузов на дальние расстояния. Однако важно помнить, что безопасность на железнодорожном транспорте должна быть главным приоритетом для всех участников этой отрасли.

На Белорусской железной дороге большое количество кривых малого радиуса. Как известно, они оказывают негативное влияние на стабильное продвижение поездопотоков за счет существенного повышения количества выдаваемых предупреждений об ограничении скорости движения поездов и отказов технических средств. Наиболее значительно это сказывается на пропускной способности. Кривые малого радиуса также являются источником повышенного износа как элементов верхнего строения пути, так и подвижного состава. Подавляющее количество аварий и крушений поездов, обусловленных недостатками прочности конструкции пути или подвижного состава, а также потерей их устойчивости, происходит на кривых участках. Повышенные динамические нагрузки на подвижной состав и инфраструктуру увеличивают риск схода состава с рельсов [1].

На Белорусской железной дороге в кривых малого радиуса используется специальное крепление для установки контррельсов – предохранительных устройств из рельсового профиля, укладываемых внутри колеи параллельно основным путевым рельсам. Основной задачей контррельса является направление колесных пар, снижение износа металла и предотвращение схода подвижного состава.

Рассмотрена конструкция контррельсового узла, предложенная Могилевским отделением Белорусской железной дороги, выполненная с использованием старогодных рельсов типа Р50. Для оценки работоспособности упорного устройства крепления разработана конечно-элементная модель в программной среде ANSYS Workbench. Проведенное моделирование с учетом нагрузки 100 кН позволило оценить характер восприятия нагрузки элементами конструкции и определить условия ее эксплуатации.

Полученные результаты показывают, что предложенная конструкция контррельсового узла может применяться на криволинейных участках железнодорожного пути малого радиуса – 349 м и менее – при небольшой интенсивности поездной работы. При этом фактические эксплуатационные нагрузки на узел крепления контррельса к ходовому рельсу в рассматриваемых условиях будут существенно ниже принятой расчетной нагрузки, что подтверждает возможность практического применения предложенного технического решения [2].

Таким образом, для снижения негативного воздействия кривых малого радиуса применяется комплекс технических и эксплуатационных мероприятий, включающий лубрикацию рельсов и гребней колес, использование контррельсовых систем и совершенствование конструкций рельсо-

вых креплений. Особое значение имеют контррельсы, обеспечивающие дополнительное направление колесных пар и способствующие повышению устойчивости подвижного состава при движении в кривых. Применение усовершенствованных контррельсовых узлов в сочетании с лубрикацией и современными конструкциями рельсовых креплений позволяет повысить надежность работы железнодорожного пути в кривых малого радиуса, снизить интенсивность износа элементов системы «колесо – рельс» и создать предпосылки для повышения безопасности движения поездов.

Список литературы

1 **Холодняк, П. С.** Влияние кривых малого радиуса на эксплуатационные показатели работы железнодорожного участка / П. С. Холодняк, Е. В. Пчелинцева // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. Транспорт.– 2025. – № 3 (75). – С. 23–31.

2 Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–19 дек. 2025 г. / Белорус. гос. техн. ун-т ; редкол.: Е. М. Жуковский (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2026. – 597 с.

УДК 625.7/.8

КОМПЛЕКСНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА УЧАСТКАХ МИГРАЦИИ ДИКИХ ЖИВОТНЫХ

Д. В. ЯСЬКО
РУП «Гомельавтодор», Республика Беларусь

И. М. ЦАРЕНКОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Качественное улучшение дорожной инфраструктуры, создание быстрого и доступного сообщения – одна из стратегических задач развития современного дорожного хозяйства. Дорожно-транспортные происшествия (ДТП) с участием диких животных являются широко распространенной проблемой. Анализ, проведенный Национальной академией наук Беларуси, показал, что местами концентрации ДТП с дикими животными в Республике Беларусь, как правило, являются участки автомобильных дорог с высокой интенсивностью транспортного потока [1].

В последние годы при реализации проектов дорожного строительства по параметрам I категории повсеместно устанавливаются заградительные сетки для защиты от выхода диких животных на проезжую часть. На остальных автомобильных дорогах в возможных местах миграции животных устанавливаются предупреждающие дорожные знаки. Однако за период 2021–2023 годов на республиканских автомобильных дорогах Гомельской области произошло 20 дорожно-транспортных происшествий с наездами на животных, в результате которых 6 человек погибли и 20 получили ранения, в т. ч. 2021 год – 10 ДТП, в 2022 – 3 и в 2023 – 7 шт. Самым опасным видом ДТП считаются дорожные аварии с участием лосей из-за габаритов животного и характера столкновения, которые приводят к значительным человеческим жертвам.

РУП «Гомельавтодор» выступил первой организацией в Республике Беларусь, реализовавшей в IV квартале 2023 года разработанный РУП «Белдорсвязь» экспериментальный проект по оборудованию наземного перехода для охотничьих животных нормируемых видов с применением интеллектуальной системы распознавания выхода животных на проезжую часть. Место устройства экспериментального участка было согласовано с предприятием лесохозяйственного учреждения. Стоимость работ составила 801 тыс. рублей, в том числе устройство заградительной сетки – 517 тыс. рублей.

Подведомственным филиалом ДЭУ № 41 были выполнены следующие работы:

1 Защитный забор (сетка) длиной 5504 пог. м, установленный по обе стороны автомобильной дороги. Посередине забора выполнен разрыв длиной 30 метров для организации наземного перехода. Основная задача защитного забора – предотвратить выход дикого животного на участок автомобильной дороги и направить его в специально оборудованный наземный переход.

2 Два участка автомобильной дороги шириной 10 метров каждый с покрытием повышенной шероховатости для копытных животных, оборудованные до и после наземного перехода. Полосы предназначены для удержания животного в наземном переходе: при наступлении на покрытие повышенной шероховатости животное испытывает дискомфорт, который побуждает его вернуться в наземный переход.

3 Для обеспечения высокого уровня безопасности дорожного движения разработана и согласована с УГАИ УВД Гомельского облисполкома схема организации дорожного движения на экспериментальном участке с ограничением скорости движения в тёмное время суток.

Схема организации дорожного движения на экспериментальном участке оборудования перехода в одном уровне для охотничьих животных на автомобильной дороге М-10 «Граница Российской Федерации (Селище) – Гомель – Кобрин» представлена на рисунке 1.

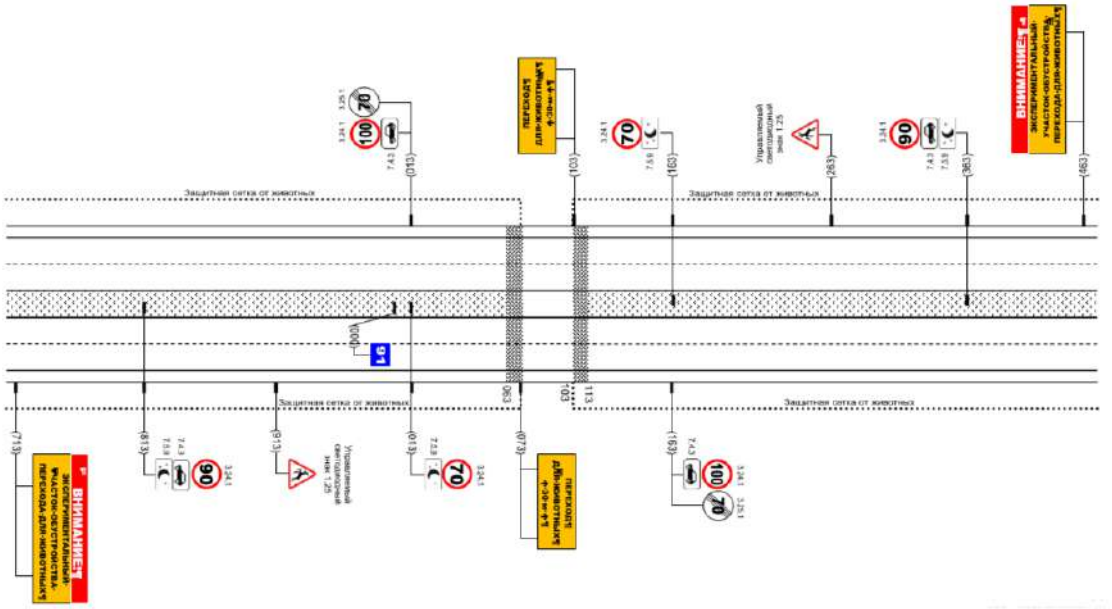


Рисунок 1 – Схема организации дорожного движения на экспериментальном участке оборудования перехода в одном уровне для охотничьих животных на а/д М-10 «Граница Российской Федерации (Селище) – Гомель – Кобрин»

Работы по устройству интеллектуальной системы распознавания выхода диких животных на проезжую часть (освещение, гибридные видеокамеры, радары-детекторы, светодиодные пано и т. п.) и настройке программного комплекса были выполнены РУП «Белдорсвязь».

В 2025 году были проведены работы по совершенствованию данной системы и добавлены лазерные прожекторы красного цвета, определяющие для водителей границу перехода животных, добавлены две видеокамеры, работающие в инфракрасном диапазоне, светодиодные знаки переменной информации. Изменена организация дорожного движения в части ограничения скорости движения в тёмное время суток для всех видов транспортных средств до 70 км/ч.

Данная система работает на основе искусственного интеллекта и позволяет классифицировать диких животных (лось, лань, олень, кабан) и информационно предупреждать участников дорожного движения о наличии животных на проезжей части данного участка. В тёмное время суток включается наружное освещение на подходах к участку для привлечения внимания водителей и при выходе диких животных с прилегающего лесного массива на обочину, проезжую часть, система включается и классифицирует это дикое животное, после чего включаются информационные светодиодные знаки и лазерные прожекторы. После того как дикое животное переходит проезжую часть, система отключается и переходит в режим ожидания. В дневное время система срабатывает аналогично.

Опыт эксплуатации экспериментального участка показал, что меры, направленные на снижение количества ДТП с участием диких животных, эффективны при работе комплекса различных инженерных средств, препятствующих выходу диких животных на проезжую часть как единой системы: сетчатые ограждения, безопасные переходы для животных, а также датчики контроля скорости движения на магистралях, которые пересекаются с миграционными путями животных.

В текущих условиях цифровизация и внедрение технологий искусственного интеллекта становятся ключевыми драйверами трансформации дорожного хозяйства. Переход от пассивных мер защиты (знаки, ограждения) к активным интеллектуальным системам, в реальном времени оценивающим биологические объекты, с прогнозом их поведения и возможностью автоматически управлять средствами оповещения, позволяет значительно повысить безопасность дорожного движения. В перспективе интеграция подобных модулей в единую платформу интеллектуальной транспортной

системы (ИТС) создаст условия для масштабирования решения на уровне всей дорожной сети страны. Накопленные данные позволят создать цифровые карты миграционных путей, что станет основой для превентивного планирования развития автодорожной инфраструктуры.

Список литературы

1 Какие меры предлагают белорусские дорожники и ученые для снижения числа ДТП с дикими животными // Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь. – URL: https://mintrans.gov.by/ru/press-tsentr/novosti/item/14473-kakie-mery-predlagayut-belorusskie-dorozhniki-i-uchenye-dlya-snizheniya-chisla-dtp-s-dikimi-zhivotnymi (дата обращения: 03.09.2026).

УДК 625.7/.8:656.13

МОДИФИКАЦИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

П. П. ЯЦЕВИЧ
Филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»,
г. Минск, Республика Беларусь

Состояние дорожного покрытия напрямую влияет на безопасность дорожного движения – значительная часть ДТП связана с неудовлетворительными дорожными условиями (колея, трещины, низкое сцепление). Традиционные органические вяжущие не всегда обеспечивают необходимую долговечность и устойчивость к климатическим и транспортным нагрузкам, что приводит к преждевременному разрушению покрытий и росту аварийности. Эффективным способом повышения эксплуатационной надёжности и безопасности дорожной инфраструктуры является модификация битума полимерными добавками, а также применение современных методов стабилизации и наномодифицирования [1, 2]. В работе рассмотрены технологические подходы к модификации, виды полимеров и их влияние на свойства покрытия, определяющие безопасность движения.

Модификация асфальтобетонных смесей осуществляется двумя основными способами: предварительное приготовление полимерно-битумного вяжущего («мокрая» технология) и сухое введение полимерных добавок непосредственно в смеситель при производстве смеси («сухая» технология) [3, 4]. Первый метод обеспечивает более равномерное распределение полимера и стабильность свойств, что критично для ответственных участков (мосты, перекрёстки, остановки). Второй – менее затратен и более экологичен, но требует повышенного расхода полимера и тщательного контроля технологического режима [3]. Выбор метода определяет не только экономическую эффективность, но и конечные эксплуатационные характеристики, от которых зависит безопасность: сопротивление сдвигу, трещиностойкость, водостойкость и сцепные свойства. В последнее время активно разрабатываются методы стабилизации смесей с повышенным содержанием вяжущего [1], а также применение механоактивированных гибридных наномодификаторов, позволяющих значительно увеличить ресурс покрытия [2].

В мировой практике модифицированные битумы применяются более 170 лет, однако современный этап характеризуется широким использованием синтетических эластомеров и термоэластопластов (стирол-бутадиен-стирольные блок-сополимеры, бутадиен-стирольные каучуки и др.) [4]. Каждый тип полимера придаёт битуму специфические свойства: термоэластопласты повышают упругость и морозостойкость, снижая риск образования трещин в переходные сезоны; эластомеры улучшают адгезию к каменным материалам; термопласты увеличивают вязкость при высоких температурах, предотвращая образование колей [5]. Все эти характеристики непосредственно влияют на безопасность – снижают вероятность аквапланирования, улучшают сцепление шин с покрытием и сокращают тормозной путь.

Анализ отечественного и зарубежного опыта показывает, что традиционные битумы имеют ограниченную трещиностойкость и быстро стареют при приготовлении смеси [5]. Это проявляется в виде температурных трещин и сетки микротрещин, которые снижают сцепление и ускоряют разрушение кромок, что напрямую повышает аварийность. Как показано в [1, 2], применение методов стабилизации и наномодификации даёт возможность не только компенсировать недостатки традиционных вяжущих, но и обеспечить долговременную устойчивость к деформациям даже при интенсивном движении. Перспективным направлением является также использование вторичных полимеров из переработанных пластиковых отходов, что позволяет решать одновременно задачи повышения качества покрытий и улучшения экологической ситуации [3].

Особо перспективно применение полимерно-битумных вяжущих в щебнемастичных асфальтобетонах (SMA), которые обеспечивают высокую шероховатость и водопроницаемость, снижая риск аквапланирования, и одновременно устойчивы к колеям. В Республике Беларусь такие смеси уже используются на наиболее загруженных магистралях, однако для массового внедрения необходимы нормативное закрепление требований к модифицированным вяжущим и совершенствование технологических регламентов производства. Современные исследования [1–3] подтверждают, что использование модификаторов и оптимизация составов позволяют дополнительно повысить устойчивость к пластическим деформациям и трещинообразованию, что особенно важно для опасных участков дорог (перекрёстки, мосты, подъёмы).

Важным аспектом повышения безопасности является обеспечение стабильного сцепления покрытия в широком диапазоне температур и влажности. В климатических условиях Беларуси, характеризующихся частыми переходами через 0 °С, особенно критичны свойства битума при низких температурах [5]. Использование эластомерных добавок позволяет сохранять эластичность вяжущего при отрицательных температурах, предотвращая образование хрупких трещин, которые резко снижают сцепные свойства. Кроме того, модифицированные битумы обеспечивают лучшую водостойкость, что снижает риск разрушения покрытия при замораживании–оттаивании и, как следствие, уменьшает образование выбоин и колейности, которые являются непосредственной причиной потери управления автомобилем [1, 2].

Внедрение модифицированных смесей требует также пересмотра нормативной базы – в частности, введения обязательных требований к применению полимерно-битумных вяжущих на участках с высокой аварийностью и интенсивным движением. Зарубежный опыт (США, страны ЕС) показывает, что регламентация использования модифицированных битумов на таких объектах, как съезды, кольцевые развязки и мостовые переходы, позволила снизить число ДТП, связанных с неудовлетворительным состоянием покрытия, на 15–20 % [3, 4]. В Беларуси назрела необходимость разработки национальных стандартов, которые бы не только допускали, но и предписывали применение модифицированных составов на приоритетных направлениях, с учётом местных климатических и нагрузочных факторов. Это должно сопровождаться ужесточением контроля качества на всех этапах – от подбора рецептуры до укладки, чтобы гарантировать заявленные характеристики покрытия [5].

Таким образом, модификация асфальтобетонных смесей является эффективным инструментом повышения безопасности транспортной инфраструктуры. Правильный выбор технологии, полимерного модификатора и соблюдение режимов приготовления позволяют создавать покрытия с высокими сцепными свойствами, устойчивостью к трещинообразованию и деформациям, что снижает количество ДТП, уменьшает затраты на текущий ремонт и увеличивает межремонтные сроки.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на адаптацию рецептур к дорожно-климатическим условиям Беларуси и разработку нормативной базы для обязательного применения модифицированных битумов на опасных и скоростных участках с учётом новейших достижений [1–5].

Список литературы

1 **Afanasenka, A. A.** Analytical review of methods for stabilizing asphalt concrete mixtures with increased binder content / A. A. Afanasenka, P. P. Yatsevich, A. V. Koronchik // Bulletin of Civil Engineers. – 2024. – № 3 (104). – P. 59–70. – DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-3-59-70.

2 Mechanoactivated hybrid nanomodifiers for increasing the operational reliability of asphalt concrete / S. A. Zhdanok, P. P. Samtsov, P. P. Yatsevich, A. A. Afanasenka // Journal of Materials and Engineering Structures «JMES». – 2026. – Vol. 13, № 4. – P. 651–666.

3 **Полякова, С. В.** Исследование возможности модификации асфальтобетонной смеси вторичными пластиками / С. В. Полякова, Ю. Э. Васильев // Дороги и мосты. – 2025. – Вып. 54, № 2. – С. 273–293. – DOI: 10.70991/1815-896X-2025-2-54-273-293.

4 **Проваторова, Г. В.** Модификация дорожных битумов полимерами / Г. В. Проваторова, Ю. С. Кандрашкина // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : электрон. сб. ст. V Междунар. науч. конф., Новополоцк, 27 окт. 2023 г. / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2024. – С. 200–204.

5 О модификации битумов и асфальтобетонных смесей для повышения сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / Т. И. Левкович, А. И. Беляков, А. Е. Билько, А. С. Тищенко // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 1 (53). – С. 53–58. – EDN: VJLTHR.

6 НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

УДК 72.017

ОСНОВНЫЕ АРХИТЕКТУРНЫЕ МЕТОДЫ, УЛУЧШАЮЩИЕ ОРИЕНТАЦИЮ В ПРОСТРАНСТВЕ ПОЖИЛЫХ ЛЮДЕЙ С КОГНИТИВНЫМИ НАРУШЕНИЯМИ

В. Н. АНАНИЧ, Н. И. СЕМЧЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Современная демографическая ситуация в Республике Беларусь характеризуется устойчивой тенденцией старения населения. Внутри группы пожилых людей наблюдается выраженная неоднородность: активные и относительно здоровые пожилые люди в большей степени ориентированы на общение и самостоятельное участие в социальной жизни. В то же время пожилым людям, утратившим частично или полностью самостоятельность, а также имеющим когнитивные нарушения, необходима забота с непрерывным уходом, профессиональным обслуживанием и безопасной средой [1].

По данным Всемирной организации здравоохранения мировая численность лиц с деменцией превышает 57 миллионов человек. Каждый год происходит почти 10 миллионов новых случаев [2]. Указанная динамика формирует принципиально новый запрос к архитектурно-градостроительной науке – жилая среда должна обеспечивать не только функциональный комфорт и доступность, но и надежность пространственной ориентации пользователя, чьи сенсорные и когнитивные возможности объективно ограничены.

Целью работы является выявление и систематизация основных архитектурных методов, способствующих повышению уровня ориентации в пространстве пожилых людей, имеющих когнитивные нарушения.

В контексте исследования надежность среды рассматривается не только как совокупность механических, эксплуатационных и противопожарных характеристик несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений, но и как способность архитектурно-пространственной среды предотвращать ошибочные действия пользователя и минимизировать риски, возникающие вследствие дезориентации.

Для пожилого человека с когнитивными нарушениями потеря ориентации во времени и пространстве является не абстрактным фактом, а прямым фактором травматизма. В ходе эскалации заболевания человек испытывает серьёзные трудности с выстраиванием последовательных действий, аналитическим мышлением и принятием решений. При подобной патологии встречаются затруднения восприятия пространства, и нередко человек становится неспособным оценить своё местоположение и осмысленно передвигаться [3]. Таким образом, человек зависит от доступных для его понимания средовых аффордансов, поэтому в первую очередь содержание и характеристики архитектурного пространства должны способствовать стабилизации состояния и комфортному пребыванию пациента без постоянного ассистирования персоналом [4].

Следует отметить, что существующая в Республике Беларусь нормативная база [5], которая включает требования безбарьерной среды, ориентирована преимущественно на физические ограничения. Она решает вопросы удобства среды для категории людей, имеющих проблемы с опорно-двигательным аппаратом, зрением, слухом и практически не учитывает когнитивную составляющую доступности. Пандусы, поручни, речевые аппараты и тактильные указатели, будучи необходимыми для физически ослабленных лиц, не решают проблемы «непрочитываемости» пространства. Человек с деменцией может не распознать назначение помещения, не идентифицировать собственную квартиру в ряду типовых дверей, не выстроить безопасный маршрут перемещения в пространстве. Таким образом, возникает противоречие между формальным соответствием объекта нормам доступной среды и фактической надежностью его эксплуатации целевой группой пользователей.

Архитектурная среда должна рассматриваться как активный инструмент поддержки ориентации, а не как нейтральный фон повседневной деятельности. Пространство становится посредником между сниженной способностью человека к восприятию и необходимостью безопасного функционирования в пространственной среде. Следовательно, проектирование жилой среды и комплексов, предназначенных для пожилых людей с когнитивными нарушениями, требует перехода от универсальных принципов доступности к специализированным методам, учитывающим особенности сенсорного и когнитивного восприятия данной группы.

Надежность ориентации в пространственной среде для пожилых людей с когнитивными нарушениями обеспечивается архитектурными решениями, которые можно систематизировать в качестве методов и использовать в проектной практике [6].

Планировочные методы. У пожилых людей с когнитивными нарушениями наблюдаются затруднения в восприятии глубины и сложных планировочных конфигураций. Пространство следует проектировать так, чтобы человек не сталкивался с визуально неоднозначными элементами, такими как ступени, пороги, резкие перепады уровня пола. Линейные маршруты, плавные переходы и отсутствие симметричных коридоров позволяют избежать ощущения «лабиринта». Необходимо, чтобы структура помещений была интуитивно понятной, а переходы между зонами воспринимались как последовательные и безопасные.

Методы световой читаемости. У пожилых людей с когнитивными нарушениями часто фиксируется искажение света и теней: темные участки воспринимаются как ямы, а яркие – как препятствия и угрозы. В связи с этим освещение должно быть равномерным, мягким и лишенным резких контрастов. Следует предусматривать отсутствие глубоких теней на полу и стенах, поскольку они могут провоцировать отказ от движения или резкое изменение траектории. Световые акценты допустимы только как навигационные ориентиры, но не как декоративные элементы, создающие визуальную неопределенность.

Методы цветовой и контрастной дифференциации. У пожилых людей с когнитивными нарушениями наблюдается ухудшение восприятия контраста и цветовых переходов: темные пятна могут восприниматься как отверстия, а резкие цветовые границы – как препятствия. Поэтому цветовые решения должны быть мягкими, с умеренными контрастами и плавными переходами. Следует избегать темных коридоров или резких цветовых блоков, которые могут провоцировать тревожность или отказ от движения. Цветовая дифференциация должна помогать ориентироваться, а не создавать ложные визуальные эффекты.

Методы пространственной идентификации. У пожилых людей с когнитивными нарушениями наблюдается снижение способности узнавать привычные места и объекты, что приводит к частой дезориентации даже в собственном жилье. В связи с этим входы в квартиру должны иметь индивидуальные визуальные маркеры – цвет, фактуру или персональный объект. Коридоры и переходы должны отличаться друг от друга по визуальному характеру, чтобы формировать последовательность запоминаемых фрагментов. Персонализация пространства помогает человеку закреплять ассоциации и снижает риск блуждания.

Методы организации внешнего пространства. У пожилых людей с когнитивными нарушениями наблюдается искажение восприятия рельефа, теней и крупных объектов в открытой среде, что делает городское пространство потенциально дезориентирующим. Поэтому внешние маршруты должны быть логичными и визуально выделенными. Следует предусматривать отсутствие резких перепадов рельефа, глубоких теней от деревьев и контрастных покрытий, которые могут восприниматься как препятствие. Узловые точки должны иметь выраженные пространственные акценты, чтобы человек мог фиксировать свое местоположение. Освещение должно быть равномерным. Вдоль маршрутов необходимо предусматривать места для кратковременного отдыха, позволяющие восстановить ориентацию.

Таким образом, представленная систематизация архитектурно-пространственных методов подтверждает, что надежная ориентация пожилых людей с когнитивными нарушениями достигается через комплексное снижение визуальной и сенсорной неопределенности среды. Планировочные, световые, цветовые и идентификационные решения формируют предсказуемую, читаемую структуру пространства, компенсирующую характерные нарушения восприятия глубины, контраста и узнаваемости объектов. Однако, несмотря на наличие системного подхода в формировании архитектурных методов проектирования пространственной среды, в перспективе считаем

целесообразным формирование комплексных социально-архитектурных моделей проживания для пожилых людей с когнитивными нарушениями.

Список литературы

1 Горгорова, Ю. В. Принципы архитектурной интеграции пространств, предназначенных для ухода за пожилыми людьми, в Китае / Ю. В. Горгорова, Ван Цань // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2026. – № 2(67). – С. 271–282.

2 Официальный сайт Всемирной организации здравоохранения. – URL: https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/dementia (дата обращения: 15.08.2026).

3 **Михальчик, Е. В.** К изучению особенностей восприятия времени и пространства у лиц с ОВЗ и инвалидностью / Е. В. Михальчик // Личность в меняющемся мире: здоровье, адаптация, развитие. – 2016. – № 3 (14). – С. 50–63.

4 **Рябушкин, Н. В.** Пространственно-средовые подходы в проектировании центров гериатрии / Н. В. Рябушкин // Architecture and Modern Information Technologies. – 2025. – № 4 (73). – С. 152–163. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2025/4kvart25/PDF/09_riabushkin.pdf (дата обращения: 10.08.2026).

5 Среда обитания для физически ослабленных лиц = Асяроддзе пражывання для фізічна аслабленых асоб : СН 3.02.12-2020. – Введ. 02.05.2021. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2021. – 25 с.

6 Designing for Dementia. – URL: https://www.firstinarchitecture.co.uk/designing-for-dementia (date of access: 11.08.2026).

УДК 681.51:69.003

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕАЛИЗАЦИИ ГНТП «ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ» НА 2026–2030 ГОДЫ

А. В. АСТРЕЛИНА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В 2025 году объём подрядных работ в строительстве Республики Беларусь превысил 27 млрд руб., при этом строительство зданий составило около 38 %, а ремонтные работы – 25 % от общего объёма. Такая структура свидетельствует о высоких эксплуатационных нагрузках на здания в течение их срока службы. Однако традиционная сметная практика ограничивается учётом капитальных вложений до момента ввода объекта в эксплуатацию, игнорируя будущие затраты на эксплуатацию, ремонты, снос и утилизацию. Это противоречит принципам циркулярной экономики, заложенным в Национальной стратегии развития экономики замкнутого цикла Республики Беларусь до 2035 года [1], а также не позволяет в полной мере реализовать цели устойчивого развития, определённые Государственной научно-технической программой «Инновационные технологии в строительстве» на 2026–2030 годы [2].

В международной практике оценка затрат на протяжении всего жизненного цикла здания регламентируется стандартом EN 15978, который выделяет модули: производство материалов (*А*1–*А*3), строительство (*А*4–*А*5), эксплуатация и обслуживание (*В*1–*В*7), а также завершающую фазу – демонтаж, переработка, захоронение (*С*1–*С*4) [3]. В линейной экономике инвестиционный цикл ограничивается этапами *А*4–*А*5, а затраты на этапы *В* и *С* перекладываются на общество. Циркулярная модель требует включения всех модулей, а также учёта ликвидационной стоимости материалов, которые могут быть возвращены в хозяйственный оборот (металл, щебень, древесина). Сравнение подходов приведено в таблице 1.

Таблица 1 – **Сравнение традиционного и циркулярного подходов к оценке затрат**

Параметр	Традиционный подход	Циркулярный подход (стоимость жизненного цикла)
Учитываемые этапы	Только *А*4–*А*5	*А*1–*А*3 + *А*4–*А*5 + *В*1–*В*7 + *С*1– *С*4
Учёт эксплуатационных затрат	Не учитываются	Дисконтируются к текущей стоимости
Учёт затрат на ремонты	Отсутствует	Включаются согласно нормативам
Учёт демонтажа и утилизации	Не включаются	Включаются (в том числе экологический налог)
Учёт ликвидационной стоимости	Отсутствует	Включается как доход от вторичных ресурсов

Оценка стоимости жизненного цикла (СЖЦ) за горизонт T, лет, выполняется по формуле

$$\text{СЖЦ} = \sum_{=0}^{T} \frac{C_t}{(1+r)} - \sum_{=0}^{T} \frac{R}{(1+r)},$$

где T – расчётный период (для жилых зданий – 60 лет); C_t – затраты на всех этапах в году t; r – норма дисконтирования (принимается на уровне 10–12 %); R_t – доходы от реализации вторичных ресурсов.

Затраты детализируются по модулям: $C_t = C_{A1\text{-}A3} + C_{A4\text{-}A5} + C_{B1\text{-}B7} + C_{C1\text{-}C4}$, при этом в модуль C включается экологический налог за захоронение непереработанных отходов. Доходы R_t формируются от продажи вторичных материалов (щебень, металлолом, древесные отходы). Методика базируется на учебно-методических материалах [4] и международных исследованиях [5].

С целью иллюстрации методики выполнен расчёт для типового многоквартирного жилого дома общей площадью 5 000 м^2 сметной стоимостью 7,5 млн руб. (удельная стоимость – 1 500 руб./м^2). Горизонт расчёта – 60 лет, норма дисконтирования – 10 %. В циркулярном сценарии учтены: ежегодное техническое обслуживание – 0,5 % от стоимости объекта; капитальный ремонт с периодичностью 25 лет – 20 % от первоначальной стоимости; демонтаж и переработка – 11 % от стоимости; экологический налог на остатки (при уровне переработки 90 %) – 0,025 млн руб.; ликвидационная стоимость – 0,75 млн руб. Результаты расчёта представлены в таблице 2.

Таблица 2 – **Результаты расчёта стоимости жизненного цикла**

В миллионах рублей

Показатель	Традиционный подход	Циркулярный подход (СЖЦ)
Капитальные вложения (этап *A*4–*A*5)	7,50	7,50
Эксплуатация и текущие ремонты (*B*1–*B*2)	–	2,10
Капитальные ремонты (*B*3)	–	0,90
Демонтаж и переработка (*C*1–*C*3)	–	0,55
Экологический налог (*C*4)	–	0,025
Итого затрат	7,50	11,075
Ликвидационная стоимость (доход)	–	0,75
Чистая стоимость цикла	7,50	10,325

Как видно из таблицы 2, традиционная оценка занижает реальные затраты на 37,7 %. Учёт полной стоимости жизненного цикла существенно изменяет приоритеты при выборе материалов: дешёвые, но недолговечные и трудноутилизируемые решения становятся экономически невыгодными в долгосрочной перспективе.

Предложенная методика непосредственно служит инструментом реализации ГНТП «Инновационные технологии в строительстве» на 2026–2030 годы [2], поскольку даёт количественный критерий устойчивого развития – стоимость жизненного цикла на 1 м² площади. Снижение этого показателя является прямым подтверждением эффективности инновационных решений. Одновременно методика соответствует Национальной стратегии циркулярной экономики [1], так как учитывает уровень переработки отходов (через экологический налог) и ликвидационную стоимость, стимулируя выбор материалов, пригодных для повторного использования, и закладку селективного демонтажа. Расчёт СЖЦ также поддерживает задачи смежных программ в области ресурсосбережения и охраны окружающей среды.

Для практического внедрения методики в Беларуси необходимо: разработать нормативный документ (СН (СП) или методические указания), гармонизированный с ISO 15686-5 [6]; включить оценку СЖЦ в состав технико-экономических обоснований для объектов с государственным финансированием; использовать показатель СЖЦ как критерий конкурсного отбора проектных и подрядных решений; создать отраслевую базу данных по эксплуатационным затратам и срокам службы материалов. Реализация этих мер позволит достичь целевых индикаторов стратегии (снижение интенсивности образования отходов до 0,4 кг/руб. ВВП, повышение уровня переработки отходов до 90 %) и повысить экономическую эффективность строительства в долгосрочной перспективе.

Список литературы

1 Национальная стратегия развития экономики замкнутого цикла (циркулярной экономики) Республики Беларусь на период до 2035 года : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь 29 мая 2024 г. № 393 // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22400393 (дата обращения: 08.05.2026).

2 Государственная научно-техническая программа «Инновационные технологии в строительстве» на 2026–2030 годы : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь 10 дек. 2025 г. № 717 // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500717 (дата обращения: 08.05.2026).

3 EN 15978:2011. Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method. – Brussels : CEN, 2011. – 56 p.

4 **Захаренко, З. Н.** Экономика строительства объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта : учеб.-метод. пособие / З. Н. Захаренко. – Гомель : БелГУТ, 2023. – 325 с.

5 **Benachio, G. L. F.** Circular economy in the construction industry: A systematic literature review / G. L. F. Benachio, M. C. D. Freitas, S. F. Tavares // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Vol. 435. – Art. №. 140524.

6 ISO 15686-5:2017. Buildings and constructed assets. – Service life planning. – Part 5: Life-cycle costing. – Geneva : ISO, 2017. – 40 p.

УДК 626.8:621.81

УСТАНОВКА ПОДКРАНОВЫХ ПУТЕЙ МОСТОВЫХ КРАНОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Е. К. АТРОШКО, И. П. ДРАЛОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Для нормативной эксплуатации мостовых кранов необходимо соблюдение ряда технических требований, предъявляемых к геометрии подкрановых путей. Основными из этих требований являются прямолинейность и горизонтальность каждой из ниток рельсов, а также условие, чтобы обе нитки рельсов были параллельны и находились на расстоянии друг от друга, соответствующем длине пролёта мостового крана.

Допустимые отклонения от проектных значений при эксплуатации рельсовых путей мостовых кранов составляет следующие величины:

– отклонение расстояний межу рельсами – 15 мм;

– отклонение рельса от прямой линии – 20 мм;

– разность высот головок рельсов на опорах – 20 мм;

– разность высот головок рельса на соседних колоннах – 15 мм.

Для проверки этих допустимых значений применяют различные геодезические способы, в состав которых входят:

– измерение расстояний между нитями рельсов;

– определение прямолинейности ниток рельсов;

– нивелирование подкрановых нитей.

В связи с расположением подкрановых путей мостового крана высоко над полом, эти геодезические работы имеют ряд особенностей.

Для измерения расстояния между нитями рельсов используют непосредственный и косвенный способы.

При непосредственном способе измерения расстояния выполняют при помощи измерительных и лазерных рулеток, при этом ширина колеи не должна превышать длину мерного прибора. Рулетку натягивают между точками, фиксирующими ось симметрии головок рельсов. При необходимости учитываются поправки за компарирования рулетки, температуру и провисание мерного прибора.

Более точным непосредственным способом является применение лазерной (электронной) рулетки и отражателя, который устанавливают на противоположной опоре мостового крана по оси головки рельса. Измерения выполняют два раза (прямо и обратно) и берут среднее арифметическое из результатов.

В соответствии с методом косвенного измерения ширину колеи определяют с помощью базиса прямой угловой засечки или способом бокового нивелирования относительно закреплённых на полу цеха параллельных осей. В этом случае все измерения выполняют внизу. Наверху необходимо только приставлять к рельсу горизонтально рейку.

Для определения прямолинейности путей применяют разные способы створных измерений. При оптическом способе створ располагают за теодолитом или электронным тахеометром, установленным на уровне рельса или на полу, а рейку прикладывают горизонтально к головке рельса и снимают с помощью оптического теодолита или электронного тахеометра отсчёты по рейке на каждой колонне. Такой способ называют боковое нивелирование. При механическом способе для установки створок линии используют металлическую струну (или леску).

Расстояние между струной и рельсом изменяют рулеткой с миллиметровыми делениями. По результатам створных измерений составляют специальный исполнительный чертёж, на котором указывают величины непрямолинейности рельса относительно створа линии.

Для определения высотного положения рельсов применяют способы геометрического и тригонометрического нивелирования.

При геометрическом нивелировании нивелир устанавливают на мостовом кране, а рейку – на головке рельса вертикально. Горизонтальным углом нивелира снимают отсчёты по рейке на каждой опорной колоне и методом горизонта нивелира определяют высоты головок рельса. При установке нивелира на полу вместо рейки применяют рулетку с грузом на конце. По результатам нивелирования по высотам точек строят продольные профили обеих ниток рельсов мостового крана.

При тригонометрическом способе нивелирования используют вместо нивелира электронный теодолит или тахеометр. В этом случае измеряют с помощью теодолита или тахеометра горизонтальные и вертикальные углы с помощью специальных марок, установленных на головке рельса. Горизонтальные углы используют для определения планового положения рельса, а вертикальные углы для определения высотного положения рельсов, при этом используют формулы тригонометрического нивелирования:

$$H_{\text{рельса}} = H_{\text{ст}} + h,$$

где $H_{\text{ст}}$ – высота стоянки теодолита или тахеометра; h – превышение головки рельса над точкой стоянки теодолита (тахеометра);

$$h = d \tan v + i - V,$$

d – расстояние от теодолита до марки, установленной на головке рельса; v – вертикальный угол на марку; i – высота теодолита под уровнем пола; V – высота марки, установленной на рельсе над уровнем пола.

По высотам марок, установленных на головке рельсов, определяют разность высот головок рельса в продольном и поперечном направлениях. Способ тригонометрического нивелирования применяют тогда, когда установить нивелир и рейки на головке рельса затруднительно или невозможно.

Рассмотренные геодезические способы определения планового и высотного положения подкрановых путей мостовых кранов были использованы авторами при реконструкции цехов Светлогорского и Гомельского домостроительных комбинатов.

Список литературы

1 **Жарников, В. Б.** О классах геометрического нивелирования для контроля деформаций / В. Б. Жарников, Б. Н. Жуков // Геодезия и картография. – 1990. – № 9. – С. 22–26.

2 **Ворошилов, А. П.** Измерение осадок зданий и сооружений электронными тахеометрами / А. П. Ворошилов // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Строительство и архитектура, вып. 3. – 2005. – № 13. – С. 37–39.

УДК 624.138.24

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ю. Г. БАБАСКИН
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Эксплуатационное состояние автомобильной дороги характеризуется соответствием или отклонением эксплуатационных показателей от нормативных, соответствующих условиям воздействия на дорожную конструкцию транспортных и природных факторов. Любое отклонение таких показателей, как ровность, прочность, сцепные качества, характеризуется возникновением дефектов, которые нарушают работоспособность объекта и не позволяют транспортным средствам двигаться в установленном режиме. В связи с этим дорожная конструкция характеризуется так называемым уровнем надежности, представляющим собой суммарное наличие одного или ряда дефектов, вызы-

вающих отказ, представляющий собой такое состояние дороги, при котором невозможно выполнение запланированного режима движения на исследуемом участке автомобильной дороги.

При диагностике исследуемого объекта, в конце расчетного срока службы, выявляются участки с наличием того или иного дефекта, приведшего к возникновению отказа. Отношение площади покрытия дорожной одежды, имеющей деформации или разрушения, к общей площади исследуемого объекта представляет определенный уровень надежности, который нормирован для каждого типа дорожной одежды. Например, для дорожной одежды капитального типа уровень надежности составляет 0,9–0,95, при расчетном сроке службы для жестких покрытий равном 30 годам и нежестким – 15, для облегченных дорожных одежд этот показатель равен 0,8–0,85 при сроке службы 10 лет, а для переходных – 0,6 при 6 годах соответственно.

В Республике Беларусь современное транспортное строительство связано с расширением возможности применения цементобетона при строительстве магистральных и местных автомобильных дорог, который имеет ряд положительных качеств. Во-первых, он прочнее и долговечнее асфальтобетона, меньше подвержен воздействию температуры в летний период, обладает необходимым сопротивлением трению, во-вторых, для производства гидравлического вяжущего республика обладает всеми необходимыми ресурсами.

Вместе с тем в течение срока эксплуатации на любое дорожное покрытие, в том числе на цементобетонное, действует ряд факторов: механических (транспорт), температурных (сопровождающихся циклическим замораживанием-оттаиванием), химических (реагенты в зимний период). Все это приводит к возникновению: трещин, являющихся началом любого процесса разрушения; очагового шелушения, коррозии цементобетона, вызванного деструктивными процессами между цементным камнем и заполнителями. В связи с этим долговечность цементобетонных покрытий зависит от целого ряда факторов, а устранение причин возникновения дефектов носит комплексный характер, включающий конструктивный, материаловедческий и технологический аспекты.

В Белорусском национальном техническом университете разработана система оценки дефектов, возникающих в дорожных конструкциях. Она заключается в том, что дорожная конструкция характеризуется тремя состояниями: исходным (новая конструкция, соответствующая всем требуемым показателям), обозначенная $Д_{10}$; конструкция, имеющая дефекты, обозначенная $Д_{20}$; конструкция после ремонта или реконструкции с использованием материалов и технологий, обозначенная $Д_{30}$.

В результате возникновения дефектов конструкция (например, дорога), как объект изучения, переходит в другое качественное состояние, т. е. система $Д_{10}$ переходит в $Д_{20}$ под действием тех факторов, которые возникают в течение срока эксплуатации. Перевод системы из $Д_{20}$ в $Д_{30}$ происходит искусственным путем с использованием новых материалов и современных технологий. Система $Д_{30}$ должна максимально приближаться к системе $Д_{10}$, но равными они не будут вследствие дискретности системы $Д_{20}$ и адгезионных качеств между компонентами нового и первоначального материалов.

Система оценки дефекта основывается на разработке структурной модели, которая формируется на основе оценки каждого компонента, с последующим переходом к функционально-структурной, выражаемой определенными параметрами, характерными для рассматриваемой системы. Структурная модель состоит из основных блоков, характеризующих качественное состояние систем и подразделение этих систем на виды и типы, выражаемые через подсистемы. Функционально-структурная модель показывает, как изменяются параметры, являющиеся едиными для всех систем, например, плотность, объем, прочность.

Система оценки дефектов включает анализ причин их возникновения, рассматривая стадию формирования структуры от геля до пространственной кристаллизации. Изучение этого процесса основано на использовании принципа континуумизации, в котором в качестве материальной точки приняты компоненты цементобетона, такие как цементный камень, крупный и мелкий заполнители, каждый из которых характеризуется прочностными показателями. В качестве материального элемента принят элементарный объем цементобетона в виде куба, в который входят выше обозначенные компоненты. За материальный цикл принята цементобетонная плита, являющаяся элементом дорожного покрытия и ограниченная продольными и поперечными швами.

При изучении материальной точки в системе $Д_{10}$ обозначены условия, характеризующие компоненты цементобетона, находящиеся в оптимальном соотношении и обеспечивающие требуемую прочность цементобетона в целом, а также прочность основания, состоящего из укрепленного грунта или крупного заполнителя.

Система $Д_{20}$ позволяет обозначить возникающие дефекты (трещины, выбоины, ямы, разрушение кромки, шелушение, отставание поверхностной обработки) с учетом нарушения структурной связи в цементном камне, крупном заполнителе, адгезионной зоне сцепления цементного камня с одним из заполнителей, либо изменения несущей способности основания. Каждая из позиций закреплена в качестве определенной подсистемы, а система $Д_{20}$ в целом учитывает комбинации отдельных подсистем. Каждый вид дефекта можно выразить посредством геометрической фигуры или с помощью математического выражения. Например, неровности можно аппроксимировать такими функциями, как синусоида, парабола, треугольная и прямоугольная кусочно-прерывистая, которые могут описать различные виды дефектов. Учитывая силу радиального удара в зависимости от радиуса колеса и жесткости шины, можно определить критические значения различных дефектов на цементобетонных покрытиях.

Система $Д_{30}$, характеризующая восстановленную конструкцию в результате ремонта или реконструкции, в свою очередь состоит из отдельных подсистем, включающих: усиление основания (при ремонте или при строительстве); заделку трещин без распиловки или с распиловкой, с последующей обработкой канала или заделкой арматуры; ремонтом выбоин, ям и кромки путем вырезки по контуру с обработкой краев и укладкой арматуры или фрезерованием; устранения участков шелушения путем фрезерования, обработкой поверхности и укладкой защитного слоя; восстановлением поверхностной обработки (при её наличии). Восстановление цементобетона, имеющего отдельные дефекты, может быть осуществлено путем применения праймера, выполняющего роль качественного адгезива, либо с помощью новых бетонных растворов, заменяющих отсутствующий разрушенный компонент.

Таким образом, рассматриваемая система оценки дефектов цементобетонного покрытия заключается в анализе перехода от новой конструкции к конструкции, имеющей дефекты, приводящие к отказу, вызывающему нарушение режима движения транспортного потока. Эта взаимосвязь вызвана воздействием механических, химических и природных факторов, а также применением новых материалов и современных технологий. Переход от состояния разрушения к состоянию восстановления осуществляется на основе анализа причин и процессов, происходящих в дорожной конструкции.

Список литературы

1 **Бабаскин, Ю. Г.** Укрепление грунтов инъектированием при ремонте автомобильных дорог / Ю. Г. Бабаскин. – Минск : УП «Технопринт», 2002. – 177 с.

2 Автомобильные дороги / Я. Н. Ковалев, И. И. Леонович, В. Н. Ярошко [и др.]. – Минск : Арт Дизайн, 2006. – 353 с.

3 Эксплуатация автомобильных дорог и организация дорожного движения / И. И. Леонович, Н. П. Вырко, К. Ф. Шумчик, А. П. Лащенко. – Минск : Выш. шк., 1988. – 348 с.

УДК624.159.2:728.1

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ УСТРОЙСТВА ИСКУССТВЕННОГО ОСНОВАНИЯ ПОД ЖИЛОЙ ДОМ В Г. ГОМЕЛЕ В СЛОЖНЫХ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЯХ

М. В. БЕСПАЛОВА, К. Л. АХМЕДЗАДЕ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Строительство в сложных инженерно-геологических условиях является одной из ключевых проблем современного фундаментостроения. Для Республики Беларусь, и в особенности для г. Гомеля, эта проблема приобретает особую остроту в связи с активным развитием жилищного строительства и освоением территорий с неблагоприятными грунтовыми условиями. В Республике Беларусь методы устройства искусственных оснований регламентируются СП 5.01.05-2025 [1] и СП 5.01.01-2023 [2]. В настоящей статье рассмотрены основные методы устройства искусственных оснований, применяемые в отечественной практике, с учётом нормативных требований и современных технологических решений.

Гомель – пойма Сожа, для которой характерны аллювиальные пески, торфы, слабые водонасыщенные грунты. В качестве усиления сложных оснований грунта в г. Гомеле применяется устройство грунтовых подушек и силикатизация песков. Наиболее используемым типом фундамента является свайный.

Актуальность усиления оснований и реконструкции фундаментов очевидна, так как многие реконструируемые объекты находятся в условиях «тесной городской застройки», кроме того, реконструкция требует значительно меньших материальных затрат по сравнению со строительством нового объекта.

Причины усиления оснований и реконструкции фундаментов [3]. Перед выбором метода усиления необходимо провести техническое обследование, включающее лабораторные испытания грунтов и материалов фундамента [4].

При реконструкции предприятий, связанной с их техническим перевооружением, надстройке дополнительных этажей, при капитальном ремонте зданий, прокладке подземных коммуникаций, возведении новых фундаментов около существующих сооружений, а также при развивающейся во времени недопустимой осадке, возникает необходимость в оценке обеспечения фундаментами дальнейшей нормальной эксплуатации сооружений, а в соответствующих случаях – в усилении и переустройстве фундаментов и их оснований.

Основными причинами, обусловливающими необходимость усиления оснований и переустройства фундаментов, являются ослабление основания в процессе эксплуатации здания или сооружения, снижение прочности материала фундамента за время эксплуатации здания или сооружения, реконструкция здания или сооружения с существенным увеличением массы здания, возведение рядом с существующим зданием нового, создающего дополнительную нагрузку на основание существующего здания (сооружения).

К основным способам упрочнения (закрепления) оснований зданий и сооружений [3] относятся физико-химические, конструктивные, механические. Характерной чертой усиления оснований является отсутствие типовых решений, поэтому проекты усиления оснований разрабатываются для конкретных случаев с учетом накопленного опыта строителей.

Методы усиления грунтов основания [2] сводятся к повышению их несущей способности путем искусственного упрочнения.

Физико-химические способы усиления оснований [3]. К апробированным физико-химическим методам упрочнения основания относятся силикатизация, цементация, смолизация, глинизация, битумизация; термический метод; электрохимическое закрепление.

Закрепление грунтов оснований силикатизацией [3]. Силикатизация – это метод, при котором под подошву фундаментов погружают инъекторы из стальных перфорированных труб, через которые производится нагнетание раствора жидкого стекла под давлением. Для ленточных фундаментов инъекторы помещают с обеих сторон с поверхности земли, из подвалов или специальных траншей. При значительных размерах фундамента закрепление грунта основания производят наклонными инъекторами. Силикатизация предназначена для закрепления песков крупных, средней крупности, мелких, лессовидных и насыпных грунтов. Метод силикатизации реализуется тремя способами: двухрастворным, однорастворным и газовым.

Закрепление грунтов оснований цементацией [2]. Цементация – это нагнетание цементного раствора под большим давлением. Применяют для закрепления грунтов, обладающих большой водопроницаемостью. Цементация применяется для уменьшения водопроницаемости грунтов и увеличения их прочности. Для мелких песков и глин цементация неэффективна ввиду низкой проникаемости.

К современным видам цементации грунтов относится струйная цементация. Струйная цементация – это современный геотехнический метод улучшения свойств грунтовых массивов, широко востребованный при возведении подземных конструкций и усилении оснований зданий. В профессиональной среде для обозначения этой группы работ используют термин Jet Grouting (от англ. jet – «струя», grouting – «инъецирование»). Суть метода состоит в разрушении структуры грунта высокоскоростной струёй цементного раствора с одновременным перемешиванием и формированием грунтоцементного массива заданных параметров.

Закрепление грунтов оснований смолизацией [2]. Смолизация заключается в нагнетании в поры грунта через систему инъекторов растворов синтетических смол, способных твердеть в грунте: кар-

бамидная смола с отвердителями; фенольные, фурановые синтетические смолы и в том числе получаемые из отходов производства.

Закрепление грунтов оснований глинизацией [2]. Глинизация используется для уменьшения водопроницаемости грунтов, как правило, песков. Нагнетание глинистой суспензии в сравнительно тонкие поры песков приводит к выпаданию в них глинистых частиц, что ведет к заилению песков. Глинизацию применяют только при небольших скоростях движения подземных вод во избежание уноса раствора из тампонированной зоны.

Закрепление грунтов оснований битумизацией [2]. Битумизацию применяют при больших скоростях фильтрации и трещиноватых скальных и полускальных породах, т. е. в условиях, когда исключается использование цементации и глинизации. Битумизация применяется для уменьшения водопроницаемости грунтов. Способ заключается в нагнетании в закрепляемый грунт битумной эмульсии. В связи с тем, что технология приготовления битумной эмульсии значительно сложнее технологии приготовления растворов для силикатизации и смолизации, способ битумизации широкого распространения не получил.

Электрохимическое закрепление [2]. Слабые грунты имеют коэффициент фильтрации, поэтому применять метод однорастворной силикатизации нельзя. Чтобы ввести растворы силиката натрия и хлористого кальция двухрастворным методом, через такие грунты пропускают постоянный электрический ток. При пропускании тока в грунтах развивается электродвижение воды, находящейся в порах, от анода к катоду. Используя это явление, через перфорированный анод вводят в грунты химические вещества, в том числе последовательно раствор силиката натрия и хлористого кальция. Этот метод позволяет закрепить грунты с низким коэффициентом фильтрации.

Конструктивные методы усиления оснований [2]. К конструктивным методам усиления оснований относятся устройство грунтовых подушек, устройство шпунтового ограждения, создание боковых пригрузок, армирование грунта, устройство противофильтрационных завес, буроинъекционные сваи, укладка геосинтетических материалов.

Устройство грунтовых подушек [2]. При действии на грунт внешней местной равномерно распределенной нагрузки наибольшие нормальные напряжения возникают в нем непосредственно в месте ее приложения. Если в пределах области возможных значительных уплотнений и зон сдвигов заменить слабый грунт на малосжимаемый с относительно высоким сопротивлением сдвигу, то можно существенно улучшить работу грунтов в основании. Примером такого решения является устройство под фундаментами подушек песчаных или из другого материала: гравия, щебня, шлака, отходов различных производств. Песчаные грунтовые подушки устраивают в слабых сильносжимаемых грунтах.

Устройство шпунтовых ограждений [2]. Шпунтовое ограждение основания применяют часто при сооружении отдельных фундаментов, для фундаментов мостовых опор, маяков, а также для фундаментов круглого очертания в плане. Шпунт забивается по всему периметру фундамента, чтобы избежать выпирание слабого грунта из-под фундамента. В этом случае через толщу слабых грунтов в относительно плотный грунт забивают шпунт с заделкой его в фундаментную плиту, под которой устраивают дренирующую песчаную подсыпку. Такое решение возможно под сооружениями, допускающими значительную осадку. Усиление оснований может быть выполнено путем устройства по периметру фундамента (ленточного, столбчатого) ограждающей стенки из шпунта, труб и свай.

Создание боковых пригрузок [2]. С целью исключения выпора слабого грунта из-под малочувствительного к неравномерным осадкам сооружениям на поверхности грунта в пределах возможной призмы выпирания иногда устраивают пригрузку. Чаще всего такое решение используют при устройстве насыпей. Пригрузки, устраиваемые путем отсыпки грунта, повышают устойчивость основания насыпи.

Армирование грунта [2]. Армирование грунтов оснований выполняют для устранения просадочности лессовых грунтов, повышения прочности и устойчивости оснований, повышения устойчивости подпорных стенок, откосов земляных сооружений и оползневых склонов. Под армированием основания понимается улучшение физико-механических свойств грунтового массива, служащего основанием, путем устройства в нем более прочных элементов, совместно работающих с грунтом и конструктивно не связанных с фундаментом какими-либо выпусками или омоноличиванием. Армирование массивов грунта основывается на взаимодействии уплотненных и закреплен-

ных массивов, а также элементов повышенной жесткости с окружающим грунтом. Достижение необходимых качеств основания добиваются за счет введения в толщу грунта элементов повышенной прочности, которые хорошо работают на сжатие или растяжение и имеют высокое сцепление и трение с окружающим грунтом.

Устройство противофильтрационных завес [2]. Для исключения подъема уровня подземных вод и предотвращения ослабления оснований применяют противофильтрационные завесы, с помощью которых защищаемую территорию отделяют от источника обводнения. Применение профильтрационных завес рекомендуется рассматривать в сочетании с дренажем, что может дать экономию за счет снижения затрат на строительство и эксплуатацию дренажа и уменьшить приток воды к защищаемому объекту. Устройство завес осуществляется как специальным оборудованием, так и общестроительным, например, экскаватором драглайном, который разрабатывает траншею, заполняемую вслед за этим глинистым грунтом.

Буроинъекционные сваи [2]. Буроинъекционные сваи – это строительные конструкции, изготовленные путем введения бетона в скважину вместо изъятого грунта. Бетон подается под давлением через полый вал шнека во время его подъема. После заполнения скважины, в нее с помощью виброустановки устанавливают армированный или жесткий каркас. Преимущество метода – долговечность конструкции с сохранением ТТХ сваи и грунта. Во время производства работ не остается пустот, в которые может выдавливаться грунт, и тем самым могут нарушаться его прочностные характеристики (параметры устойчивости). Данная технология является востребованной для строительства высотных и нагруженных зданий, сооружений на любых типах почв, как такая, что обеспечивает высокую надежность и долговечность оснований без значительных земляных работ и нарушения характеристик грунта.

Укладка геосинтетических материалов. Геосинтетики – это искусственные (полимерные или геотекстильные) материалы, используемые для улучшения грунта и повышения прочности фундаментов. Основные функции геотекстиля:

– разделение слоев: не дает насыпным слоям смешиваться, что сохраняет несущие и дренажные свойства основания;

– дренажирование: жидкость не проникает в слои, расположенные под геотекстилем, благодаря возможности отводить воду;

– армирование: основание получается упругим, нагрузка на него распространяется равномерно, а несущая способность почвы усиливается.

Механические методы упрочнения оснований [2]. Поверхностное уплотнение грунтов:

– уплотнение трамбовками и трамбующими машинами;

– уплотнение площадочными вибраторами;

– укатка катками и грузоуплотняющими машинами;

– вытрамбовывание котлованов или траншей под фундаменты.

Глубинное уплотнение грунтов:

– устройство грунтовых, шлаковых, грунтоцементных известковых свай;

– глубинное виброуплотнение;

– предварительное замачивание;

– предварительное замачивание с подводными взрывами;

– глубинные взрывы после предварительного замачивания;

– глубинное глино-виброуплотнение взрывами;

– предварительное обжатие грунтов;

– понижение уровня подземных вод;

– уплотнение внешней пригрузкой.

Практические примеры. 24-этажный «небоскреб» на улице Мазурова (и строящиеся аналогичные высотки). Это самое высокое панельное здание в Беларуси (высота 74,25 м). Так как серия панельного дома 152М изначально рассчитывалась максимум на 14 этажей, для возведения 24-этажки была полностью переработана нижняя часть. Здание имеет мощное свайное основание с монолитным железобетонным ростверком [5]. Из-за особенностей рельефа и близости к водоемам под ними монтируются усиленные плитные или свайно-плитные фундаменты, которые конструктивно «гасят» и равномерно распределяют деформацию грунтового основания [6]. Дворец Румянцевых – Паскевичей. Главная достопримечательность города стоит на высоком крутом берегу Сожа.

Во время послевоенного восстановления и последующих реконструкций фундаменты центральной части и башни укреплялись, а береговая зона под ними получала дополнительное инженерное усиление (подпорные стены, дренаж), чтобы исключить оползни и просадку фундамента [7, 8].

Усиление основания зданий и сооружений – одна из самых сложных задач в строительстве. Поиск решений этой проблемы привёл к появлению всё новых способов укрепления оснований зданий и сооружений, позволил расширить горизонты застроенных территорий и продлить срок службы памятников архитектуры и искусства. И объем таких работ будет увеличиваться снова и снова, отражая необходимость поиска новых способов укрепления оснований зданий и сооружений. Долговечность жилых зданий, их соответствие назначению во многом определяются состоянием оснований и фундаментов. Система «основание – фундамент» является наиболее сложной в моделировании и предвидении ее функционирования в процессе возведения и особенно эксплуатации зданий и сооружений. Эта система в эксплуатационных условиях постоянно испытывает одновременное, зачастую трудно учитываемое воздействие многих факторов, из которых наиболее значительными являются изменения свойств основания, природные явления и воздействия, связанные с деятельностью человека.

Список литературы

1 СП 5.01.05-2025. Фундаменты плитные. – Введ. 15.09.2025. – Минск : Минстройархитектуры, 2025. – IV, 124 с.

2 СП 5.01.01-2023. Общие положения по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений. – Введ. 15.05.2023. – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2023. – 150 с.

3 **Коробова, О. А.** Усиление оснований и реконструкция фундаментов : учеб. пособие / О. А. Коробова ; Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин). – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2008. – 332 с.

4 ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик : межгосударственный стандарт. – Введ. 01.04.2016. – М. : Стандартинформ, 2015. – 19 с.

5 В Гомеле построили самый высокий в стране жилой дом из панелей. Его назвали «небоскребом» // Realt.by. – 2025. – 29 мая. – URL: https://realt.by/gomel-region/news/article/43335/ (дата обращения: 14.09.2026).

6 18-этажный жилой дом № 1, микрорайон № 21 // Облисполком Гомельской области. – URL: http://obluksgomel.by/content/18-etazhnyy-zhiloy-dom-no1-mikrorayon-no21 (дата обращения: 14.09.2026).

7 Достопримечательности Гомеля и Гомельской области // TripAdvisor. – URL: https://www.tripadvisor.ru/Attractions-g297309-Activities-c47-t3-Gomel_Gomel_Region.html (дата обращения: 14.09.2026).

8 Современные варианты усиления фундаментов зданий и сооружений // ГЕО-БГ. – URL: https://geo-bg.ru/news/sovremennye-varianty-usileniya-fundamentov-zdanij-i-sooruzhenij/ (дата обращения: 14.09.2026).

УДК 691:697.7

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПАНЕЛЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ ЗДАНИЯХ

И. А. БОРИСЕНКО, Н. В. ЧЕРНЮК

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Современное строительство предъявляет повышенные требования к энергоэффективности зданий, что обусловливает широкое применение теплоизоляционных панелей. Данные изделия представляют собой многослойные конструкции, состоящие из несущих слоёв (обычно из металла, древесины или цементно-стружечных плит) и утепляющего сердечника. Они позволяют значительно снизить теплопотери через ограждающие конструкции, одновременно уменьшая массу здания и ускоряя монтаж [1, 2]. В зависимости от назначения различают стеновые, кровельные и фасадные панели, а также изделия для холодильных камер и специальных сооружений. По конструктивному исполнению выделяют сэндвич-панели с жёсткими обшивками, термопанели с декоративным слоем и структурные изоляционные панели (SIP) [3, 4].

В качестве теплоизоляционного заполнителя в современных панелях используются различные материалы, каждый из которых обладает определёнными достоинствами и ограничениями. Минеральная вата на основе базальтового волокна обеспечивает высокую огнестойкость (класс пожарной опасности КМ0) и отличное звукопоглощение, однако требует надёжной гидроизоляции. Пенополиизоцианурат (PIR) и пенополиуретан (PUR) характеризуются наименьшей теплопроводностью (до 0,022 Вт/(м·К)), высокой прочностью на сжатие и стойкостью к биоповреждениям. Пенополи-

стирол (EPS) – экономичный вариант, но его применение ограничено требованиями пожарной безопасности [1, 2, 5]. В последние годы активно развиваются экологичные решения на основе возобновляемого сырья: в работах белорусских учёных исследованы теплоизоляционные плиты из коры деревьев, льняного волокна и других растительных отходов, которые позволяют утилизировать вторичные ресурсы и снижать углеродный след [6, 7].

Применение теплоизоляционных панелей в строительстве обеспечивает комплекс технико-экономических преимуществ. Во-первых, значительно повышается энергоэффективность зданий: согласно исследованиям, фасадные термопанели позволяют экономить на отоплении до 40 % по сравнению с традиционными конструкциями [8]. Во-вторых, снижаются нагрузки на фундамент и несущие конструкции благодаря малому весу панелей (в 5–10 раз легче кирпичной кладки). В-третьих, достигается высокая скорость монтажа: установка панелей не требует «мокрых» процессов, что позволяет вести работы круглогодично. Кроме того, панели обеспечивают высокую заводскую готовность, минимальную трудоёмкость отделки и длительный срок службы (до 50 лет) [3, 4, 9].

В Республике Беларусь производство теплоизоляционных материалов является одной из приоритетных отраслей строительной индустрии. Крупнейший производитель – ОАО «Гомельстройматериалы» – выпускает теплоизоляционные плиты из минеральной ваты под торговой маркой «БЕЛТЕП». Предприятие ежегодно поставляет продукцию не только на внутренний рынок, но и экспортирует в Россию, Сербию, Италию, Чехию, Словакию и Польшу. В 2023 году на модернизацию производства было направлено более 5 миллионов рублей, что позволило увеличить выпуск высококачественных плит с улучшенными теплотехническими характеристиками [9]. Кроме того, в стране функционируют производители сэндвич-панелей с утеплителями PIR/PUR (например, заводы группы компаний «МеталлПрофиль»), а также ведутся разработки инновационных панелей на местном растительном сырье [6, 7].

Важным аспектом применения теплоизоляционных панелей является обеспечение пожарной безопасности. Сотрудники Белорусского научно-исследовательского института пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций провели комплекс испытаний кровельных сэндвич-панелей с утеплителем PIR Premier. Результаты подтвердили их огнестойкость на уровне RE 30 – конструкция выдержала в испытательной камере более 35 минут без потери несущей способности и целостности. Испытания проводились в строгом соответствии с требованиями ГОСТ 30247.0-94 [3, 5]. Также нормативная база включает СН 2.02.05-2020 «Пожарная безопасность зданий и сооружений», которые устанавливают требования к пожарной безопасности ограждающих конструкций, в том числе панельных систем [10].

Сравнительный анализ различных видов панелей показывает, что наибольшей популярностью в Беларуси пользуются металлические сэндвич-панели с минераловатным заполнителем благодаря оптимальному сочетанию цены, огнестойкости и теплоизоляционных свойств. Для малоэтажного строительства всё чаще применяются SIP-панели с пенополистирольным сердечником, обеспечивающие высокую жёсткость и простоту сборки. В общественных и производственных зданиях предпочтение отдают панелям PIR/PUR, которые позволяют сократить толщину ограждений при сохранении требуемого термического сопротивления [1, 2, 4].

Современные тенденции развития теплоизоляционных панелей связаны с повышением их экологичности и энергоэффективности. Исследования белорусских учёных демонстрируют перспективность использования в качестве наполнителя композитов из коры хвойных пород, льно-костры и других отходов дерево- и сельхозпереработки. Такие панели имеют теплопроводность на уровне 0,045–0,055 Вт/(м·К), что сопоставимо с минераловатными аналогами, но при этом они биоразлагаемы и дешевле [6, 7]. Ведётся также работа по созданию панелей с фазопереходными материалами, способными аккумулировать тепло и сглаживать суточные перепады температуры в помещении.

Экономическая эффективность применения теплоизоляционных панелей подтверждается расчётами окупаемости. Для жилых зданий дополнительное утепление фасадов панельными системами окупается в среднем за 3–5 отопительных сезонов за счёт сокращения расходов на отопление и кондиционирование. В производственных и складских комплексах срок окупаемости ещё меньше благодаря снижению эксплуатационных затрат на поддержание микроклимата [8, 9].

Таким образом, теплоизоляционные панели являются эффективным и востребованным строительным материалом, обеспечивающим энергосбережение, сокращение сроков строительства, снижение эксплуатационных затрат и повышение комфорта зданий. Дальнейшее развитие отрасли в

Республике Беларусь связано с совершенствованием нормативной базы, внедрением инновационных экологичных материалов, расширением производственных мощностей и углублением научных исследований в области теплофизики многослойных конструкций.

Список литературы

1 **Сизов, В. Д.** Эффективная многослойная стеновая панель / В. Д. Сизов, А. В. Павловская // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 5. – С. 410–418.

2 **Гришанович, А. П.** Сравнительный анализ теплоизоляционных панелей для ограждающих конструкций / А. П. Гришанович // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 1. – С. 84–88.

3 **Белокобылова, А. Б.** Анализ технологических особенностей использования сэндвич-панелей при строительстве зданий и сооружений на транспорте / А. Б. Белокобылова, С. Д. Королев, Т. В. Яшина // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж. д. (Гомель, 24–25 ноября 2022 г.) : в 2 ч. Ч. 2 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С.9–11.

4 **Захарчук, Ю. В.** Анализ прочностных характеристик сэндвич-панелей при эксплуатационной нагрузке / Ю. В. Захарчук, К. А. Курчев // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж. д. (Гомель, 25–26 ноября 2021 г.) : в 2 ч. Ч. 2 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2021. – С. 133–135.

5 ГОСТ 32603-2021. Панели металлические трехслойные с утеплителем из минеральной ваты. Технические условия. – Введ. 01.04.2022. – Минск : Госстандарт, 2021.

6 Использование коры в производстве теплоизоляционных строительных материалов (обзор) / В. А. Кузьмин, Л. В. Радкевич, З. Пастори [и др.] // Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2023. – № 1 (264). – С. 177–186.

7 **Романовский, С. А.** Теплоизоляционные плиты на основе волокнистого растительного сырья / С. А. Романовский, А. А. Бакатович // Актуальные проблемы архитектуры Белорусского Подвинья и сопредельных регионов : электрон. сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2021. – С. 32.

8 Стены, которые нас согревают // sb.by. – 2025. – URL: https://www.sb.by/articles/steny-kotorye-nas-sogrevayut.html. (дата обращения: 02.09.2026).

9 Фундамент успеха // sb.by. – 2024. – URL: https://www.sb.by/articles/fundament-uspekha.html. (дата обращения: 02.09.2026).

10 СН 2.02.05-2020. Пожарная безопасность зданий и сооружений. – Введ. 04.04.2021. – Минск : Минстройархитектуры, 2020.

УДК 004.8:625

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ЗАДАЧ СТРОИТЕЛЬСТВА ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

К. Е. ВАСИЛЬЕВ, В. М. ПРАСОЛ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Искусственный интеллект (ИИ) – критически важный инструмент повышения надёжности, безопасности и эффективности транспортной инфраструктуры. Ключ – дифференцированный подход.

ИИ для повышения надежности и долговечности конструкций

Надежность и долговечность зданий и сооружений являются фундаментальными характеристиками, определяющими безопасность их эксплуатации. Традиционно оценка этих параметров основывается на вероятностных методах, таких как расчет вероятности отказа, метод предельных состояний, оценка физического износа конструктивных элементов и прогнозирование остаточного ресурса [5]. Искусственный интеллект позволяет вывести эти методы на новый уровень благодаря своей способности обрабатывать огромные массивы неструктурированных данных и выявлять скрытые закономерности.

Дифференциация методов ИИ

Для прогнозирования усталостных разрушений и оценки остаточного ресурса наиболее эффективным является применение гибридных моделей на основе машинного обучения, например, комбинации XGBoost и LSTM (Long Short-Term Memory). Исследования показывают, что такие модели могут достигать высокой точности в прогнозировании состояния конструкций, а также прогнозировать стоимость и сроки с минимальной погрешностью, что критически важно для планирования ремонтов и предотвращения аварий [1, 5].

ИИ для повышения безопасности на транспорте и вокзалах

Безопасность пассажиров и персонала на объектах транспортной инфраструктуры – железнодорожных вокзалах, станциях метро, аэропортах – требует системного подхода, который выходит за рамки контроля конструкций. Здесь ИИ играет ключевую роль в управлении поведенческими факторами и физическими параметрами среды.

Дифференциация методов ИИ (таблица 1)

1 Для контроля поведения толпы и предотвращения давки. Вокзалы и станции являются местами массового скопления людей. Современные системы, использующие видеоаналитику и глубокое обучение (например, YOLOv8 для детекции объектов и Deep SORT для многообъектного трекинга), позволяют в реальном времени анализировать плотность потока, скорость и траектории движения пассажиров [1, 5]. Такие системы, как CrowdSentry, классифицируют зоны на «безопасные», «перегруженные», или «зоны высокого риска», и автоматически уведомляют операторов при превышении пороговых значений [1]. Это позволяет не просто реагировать на чрезвычайные ситуации, а прогнозировать их.

2 Для выявления потенциальных угроз. ИИ-системы видеонаблюдения нового поколения способны фиксировать оставленные предметы, попытки прохода в запрещенные зоны, аномальное скопление людей или длительное нахождение человека в нетипичном месте [1]. Они работают без участия оператора, снижая влияние человеческого фактора и сокращая время реагирования.

3 Для моделирования эвакуационных сценариев. На этапе проектирования (или реконструкции) вокзалов и станций можно использовать глубокие нейронные сети для интерактивного прогнозирования критических зон в планировке здания. Обучая такие сети на данных симуляций эвакуации (например, с использованием моделей социальных сил), можно уже на стадии BIM-моделирования выявлять узкие места и оптимизировать пути эвакуации.

Таблица 1 – **Дифференциация методов ИИ**

Задача	Метод	Инструмент
Износ конструкций	LSTM + XGBoost	IBM Maximo
Дефекты	CNN + CV	Doxel AI
Безопасность (толпа)	YOLO + Deep SORT	CrowdSentry
Эвакуация	Глубокие нейросети	ML-модули
Графики	Генеративный дизайн	ALICE
Логистика	ML + ERP	1C + ML
Планирование	Цифровые двойники	Autodesk Tandem

ИИ для эффективности и территориального размещения объектов

Эффективность строительства и эксплуатации напрямую зависит от логистики, управления ресурсами и правильного территориального планирования. Здесь ИИ позволяет минимизировать издержки и повысить качество принимаемых решений.

Дифференциация методов ИИ

Для территориального планирования и благоустройства: ИИ может анализировать рельеф, солнечное освещение, розу ветров и привычные маршруты жителей. Это позволяет определять оптимальные места для размещения транспортных узлов, остановок и элементов благоустройства, таких как парки и скверы. Более того, ИИ-системы могут разрабатывать оптимальные планировочные решения для целых районов, учитывая «зеленую» инфраструктуру для снижения эффекта «теплового острова» [3]. В Республике Беларусь, согласно Государственной программе «Цифровая Беларусь» на 2026–2030 годы, это направление становится приоритетным для формирования комфортной городской среды [3, 4].

Список литературы

1 Deloitte. Artificial Intelligence and Advanced Data Analytics in Construction: Cost Savings and Efficiency Gains. – 2024. – (Данные о снижении затрат на 10–15 %, сокращении отклонений от сроков на 10–20 % и уменьшении проектных часов на 10–30 %). – URL: http://www.deloitte.com/ce/en/industries/industrial-construction/perspectives/the-age-of-with-ai-in-construction- and-infrastructure.html. (date of access: 10.09.2026).

2 Sund & Bælt Holding A/S. Intelligent Infrastructure with IBM Maximo: Project Profile – ABS Group, 2024. – (Кейс использования IBM Maximo Application Suite для мониторинга мостов и тоннелей, включая Great Belt Fixed Link, с применением дронов и ИИ-анализа). –. URL: https://www.abs-group.com/Knowledge-Center/Project-Profiles/Sund-B%C3%A6lt-Finds-Value-in-Intelligent-Infrastructure-with-IBM-Maximo (date of access: 10.09.2026).

3 Государственная программа «Цифровая Беларусь» на 2026–2030 годы : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 30 дек. 2025 г. № 793 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500793 (дата обращения: 11.09.2026).

4 Государственная научно-техническая программа «Инновационные технологии в строительстве» на 2026–2030 годы : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 10 дек. 2025 г. № 717 // М-во архит. и стр-ва Республики Беларусь. – Минск, 2025. – URL: https://pravo.by/novosti/novosti-pravo-by/2025/december/91381/ (дата обращения: 11.09.2026).

5 **Прасол, В. М.** Компаративный анализ возможностей искусственного интеллекта для задач строительства объектов транспортной инфраструктуры / В. М. Прасол, М. А. Скибунов, В. В. Шелюто // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. пятилетке качества (Гомель, 20–21 нояб. 2025 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Н. Н. Казакова. – Гомель : БелГУТ, 2025. – URL: http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/14276/390-391.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 11.09.2026).

УДК 539.3:534.1

ОЦЕНКА ВИБРАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЗАКРЕПЛЕНИЯ

К. В. ВЕРЕЩАГИН
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Развитие современных транспортных и строительных конструкций сопровождается широким применением композиционных и комбинированных материалов, позволяющих снизить массу конструкций при сохранении требуемых прочностных и эксплуатационных характеристик. такими материалами являются стеклопластик и углепластик, обладающие сочетанием малой удельной массы, жесткости, прочности и устойчивости к воздействию внешней среды.

В процессе эксплуатации конструктивные элементы из вышеназванных материалов могут подвергаться воздействию переменных нагрузок и вибраций. Вибрационные воздействия способны приводить к возникновению циклических деформаций, изменению напряженно-деформированного состояния и, при неблагоприятном сочетании параметров возбуждения и собственных характеристик конструкции, к появлению резонансных явлений. Поэтому экспериментальное определение динамических характеристик таких элементов является важной задачей при оценке их надежности и безопасности.

При этом на результаты вибрационных испытаний влияет не только материал исследуемого образца, но и способ его установки на вибрационном стенде. Испытательная оснастка является частью общей динамической системы «вибрационный стенд – оснастка – образец». Ее жесткость, масса и способность к деформированию определяют условия передачи возбуждающего воздействия на исследуемый элемент.

Целью работы являлось исследование влияния материала и жесткостных характеристик испытательной оснастки на вибрационный отклик пластин из стекло- и углепластика.

Экспериментальные исследования проводились на вибрационном стенде. Для закрепления образцов применялись два варианта оснастки.

В первом варианте использовались деревянные брусья, прижимаемые к пластине посредством струбцин. Данный способ закрепления характеризуется относительно податливой системой передачи нагрузки, поскольку деревянные элементы способны деформироваться под действием динамической нагрузки.

Во втором варианте применялся металлический профиль, имеющий геометрические размеры, сопоставимые с размерами использованных деревянных брусьев. Металлический профиль обладает существенно большей жесткостью, вследствие чего изменяются динамические свойства системы закрепления и характер передачи вибрационного воздействия на пластину.

Таким образом, при проведении сравнительного исследования основные геометрические условия закрепления сохранялись, а одним из основных изменяемых факторов являлся материал оснастки. Это позволило оценить влияние различной жесткости закрепляющей системы на результаты вибрационного испытания.

Особое значение имеет тот факт, что реальное закрепление образца на вибрационном стенде отличается от идеализированных граничных условий, используемых при расчетном моделировании. В расчетных исследованиях часто принимается абсолютно жесткое или шарнирное закреп-

ление, тогда как реальная система обладает определенной податливостью. Поэтому экспериментальное исследование влияния оснастки позволяет уточнить представление о фактических условиях работы конструкции.

Проведенные испытания показали, что изменение материала оснастки оказывает влияние на условия закрепления исследуемой пластины и ее динамическое поведение. При использовании деревянных брусьев часть вибрационного воздействия воспринимается элементами оснастки, которые вследствие своей податливости могут совершать собственные деформации. В результате динамическая система приобретает дополнительные степени свободы, а условия передачи возбуждения на пластину отличаются от условий жесткого закрепления.

При использовании металлического профиля жесткость системы закрепления возрастает. Это приводит к более непосредственной передаче вибрационного воздействия от стенда к образцу и изменению характера его колебаний. Вследствие различия жесткостных характеристик деревянной и металлической оснастки могут изменяться амплитуды колебаний, характер деформирования и положение областей с максимальными динамическими перемещениями.

Следовательно, материал испытательной оснастки нельзя рассматривать исключительно как вспомогательный фактор экспериментальной установки. Он оказывает непосредственное влияние на динамическую систему и может определять характер получаемых экспериментальных данных.

Особенно важным данный фактор становится при исследовании конструкций, работающих в условиях длительного вибрационного воздействия. Если при проведении испытаний используется недостаточно жесткая или существенно деформируемая оснастка, полученные результаты могут характеризовать не только свойства исследуемой пластины, но и совместное поведение пластины и элементов закрепления.

Сравнение двух вариантов оснастки позволяет сделать вывод о необходимости стандартизации условий закрепления при проведении вибрационных испытаний. При сравнении результатов различных экспериментов применение оснастки с различными жесткостными характеристиками может привести к неоднозначной интерпретации полученных данных. Поэтому при разработке методики испытаний необходимо учитывать материал, геометрию и жесткость элементов крепления.

Полученные результаты имеют практическое значение для оценки надежности конструктивных элементов из угле- и стеклопластика. При проектировании и экспериментальной проверке таких элементов необходимо рассматривать систему закрепления как составную часть испытательной модели. Это особенно актуально для элементов, предназначенных для эксплуатации в условиях динамических и вибрационных нагрузок.

В заключение необходимо отметить, что по результатам проведенного исследования установлено, что материал испытательной оснастки является значимым фактором, влияющим на условия вибрационного нагружения пластин. Сравнение оснастки, выполненной из деревянных брусьев, и металлического профиля сопоставимых размеров показало принципиальное различие в жесткости закрепляющей системы.

УДК 628.353.15:574.635

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НИТЧАТЫХ БАКТЕРИЙ НА СТРУКТУРУ АКТИВНОГО ИЛА

А. А. ГРИБ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Эффективность работы емкостных сооружений с активным илом (аэротенков) определяется жизнедеятельностью активного ила – искусственно выращиваемого биоценоза, населенного гелепродуцирующими бактериями гетеротрофами, хемотрофами, простейшими и многоклеточными животными, которые трансформируют загрязняющие вещества и очищают сточные воды в результате биосорбции, биохимического окисления, выедания бактерий и простейших [1].

В ходе эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод одной из наиболее частых проблем является формирование устойчивой пены на поверхности аэротенка. В отличие от обычной белой (химической) пены, вызванной избытком поверхностно-активных веществ (ПАВ), истинное

пенообразование напрямую связано с развитием процесса вспухания активного ила вследствие массового развития нитчатых форм микроорганизмов активного ила.

Объектом исследования являются очистные сооружения г. Речицы. Видовой состав микроорганизмов активного ила аэротенка представлен сложным биоценозом, структура которого сформировалась под воздействием специфических физико-химических показателей поступающих сточных вод. Специфика сточных вод Речицы обусловлена совместным отведением хозяйственно-бытовых вод города и значительного объема производственных сточных вод предприятий деревообрабатывающей, метизной и пищевой промышленности, а также объектов нефтедобывающего кластера. Данный многокомпонентный субстрат, содержащий органические соединения, азот-, фосфорсодержащие вещества и концентрации трудноокисляемых углеводородов, определяет гетерогенный характер микробного сообщества.

Основу биомассы активного ила (до 90–95 %) составляют бактериальные культуры, формирующие зооглейные скопления и флокулы (хлопья). В условиях действующих аэротенков филиала «Речицаводоканал» доминируют гетеротрофные микроорганизмы родов *Pseudomonas* (осуществляющие деструкцию остаточных поверхностно-активных веществ и углеводородных радикалов), *Zoogloea* (отвечающие за биофлокуляцию и седиментационную способность ила), а также представители родов *Acinetobacter*, *Flavobacterium* и *Achromobacter*, обеспечивающие глубокую деструкцию белковых и углеводных компонентов.

Процессы нитрификации поддерживаются автотрофными популяциями хемолитоавтотрофных бактерий родов *Nitrosomonas* и *Nitrobacter*. При эпизодических колебаниях pH субстрата или увеличении углеводной нагрузки в биоценозе фиксируется незначительное присутствие нитчатых бактерий (в частности, *Sphaerotilus)*, однако их численность строго лимитируется технологическим режимом во избежание ухудшения седиментационных свойств (вспухания) ила.

Маркером стабильности биологической очистки служит индикаторное сообщество простейших и многоклеточных организмов, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – **Видовой состав активного ила на очистных сооружениях г. Речицы**

Группа микроорганизмов	Основные представители (род, вид)	Технологическое значение
Кругоресничные инфузории	*Vorticella convallaria, Vorticella microstoma, Carchesium, Epistylis*	Свидетельствуют о достаточном уровне растворенного кислорода и равномерной гидродинамической нагрузке
Свободноплавающие инфузории	*Paramecium caudatum, Colpidium*	Массово развиваются в периоды повышенной органической нагрузки или при снижении возраста активного ила
Ползающие инфузории	*Aspidisca costata, Stylonychia*	Доминирование рода *Aspidisca* указывает на нитрифицирующий характер работы аэротенка и глубокую деструкцию органических загрязнений
Коловратки	*Philodina, Rotaria*	Присутствуют в зрелом, хорошо адаптированном активном иле. Служат индикатором высокого возраста ила и глубокой минерализации осадка
Амебы (раковинные и голые)	*Arcella, Amoeba limax*	Появляются в биоценозе в периоды дефицита растворенного кислорода или при залповых сбросах токсичных стоков

Биоценоз здорового активного ила представлен плотными, тяжелыми хлопьями округлой формы, сформированными зооглейными бактериями, что обеспечивает высокую сорбционную способность и быструю седиментацию во вторичных отстойниках. Массовое развитие нитчатых микроорганизмов приводит к перестройке структуры ила. Длинные, ветвящиеся нити бактерий прорастают сквозь хлопья ила, выходя далеко за их анатомические границы. Хлопья теряют компактность, их структура становится диффузной, рыхлой и сетчатой. Визуально под микроскопом такой ил напоминает спутанный комок ниток. За счет рыхлости геометрические размеры хлопьев резко увеличиваются, однако их удельный вес падает. Ил становится «воздушным». Это приводит к росту илового индекса – важного показателя седиментации. Такой видоизмененный ил практически теряет способность к осаждению. Внутри деформированного, пористого хлопка легко застревают не только пузырьки воздуха из системы аэрации, но и микропузырьки газообразного азота – продукта процесса денитрификации. Каждый хлопок ила превращается в своеобразный микропоплавок, стремящийся всплыть на поверхность. На поздних стадиях развития процесса структура ила в верхнем слое аэротенка окончательно разрушается, и на поверхности зеркала воды формируется так называемый пенистый шлам.

На основе видового состава активного ила, а также специфики состава сточных вод выделены основные маркеры технологического контроля за структурными изменениями в активном иле на очистных сооружениях г. Речицы:

1) рост илового индекса служит маркером ухудшения седиментации;

2) преобладание свободноплавающих инфузорий указывает на перегрузку очистных сооружений по органическим веществам;

3) массовое размножение амеб и червей свидетельствует о дефиците кислорода (менее 2 мг/л) [2];

4) изменение формы и гибель простейших указывают на токсический шок в аэротенке.

Установлено, что развитие нитчатых форм бактерий разрушает зооглейную структуру хлопьев, приводя к росту илового индекса и потере седиментационных свойств, что приводит к образованию пены. Выделенные маркеры технологического контроля позволяют дифференцированно диагностировать ухудшение седиментации, органическую перегрузку, дефицит растворенного кислорода (менее 2 мг/л) и токсический шок в аэротенке, обеспечивая надежную информацию для принятия оперативных технологических решений.

Список литературы

1 **Жмур, Н. С.** Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. С. Жмур. – М. : АКВАРОС, 2003. – 512 с

2 Канализация. Наружные сети и сооружения: СН 4.01.02-2019. Введ. 09.07.2020 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2026.

УДК 691.32:536.413.2

РАСТВОРНЫЕ СОСТАВЫ С РЕГУЛИРУЕМЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ЛИНЕЙНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСШИРЕНИЯ

А. В. ГРОБОК, Д. С. ШУТОВ, М. В. ЛАТУН, А. А. ВАСИЛЬЕВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

При ремонте защитного слоя бетона одной из основных проблем является обеспечение надежной и долговечной совместной работы «старого бетона» и нового ремонтного слоя [1]. Ключевой параметр, определяющий эту совместимость, – коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР). Несоответствие КЛТР ремонтного состава и материала основания приводит к возникновению термических напряжений при перепадах температур, что вызывает усталостные явления в контактной зоне, отслоение и преждевременное разрушение отремонтированного участка, с возникновением и развитием (различной степени интенсивности) коррозии стальной арматуры.

КЛТР тяжёлого бетона $(10…14{,}5)\cdot10^{-6}\ °C^{-1}$. Значение КЛТР не является постоянной величиной и зависит от типа заполнителя (кварц – $(10…13)\cdot10^{-6}$, известняк – $(4…8)\cdot10^{-6}$, базальт – $(5…9)\cdot10^{-6}\ °C^{-1}$), влажностного состояния бетона, а также состава цементного камня. Именно тип заполнителя, занимающего до 70–80 % объёма, является основным фактором, определяющим КЛТР композита [2].

При несоответствии КЛТР ремонтного состава и бетонного основания в контактной зоне при изменении температуры на ΔT возникают термические напряжения, приближённо оцениваемые как

$$\sigma \approx \Delta\alpha \Delta T E, \qquad (1)$$

где $\Delta\alpha$ – разница КЛТР, $°C^{-1}$; ΔT – температурный перепад, °С; E – модуль упругости, МПа.

Циклический характер температурных воздействий приводит к накоплению усталостных повреждений и разрушению сцепления «старого» и «нового» бетонов.

Регулирование КЛТР ремонтных составов достигается следующими методами. Подбор типа заполнителя позволяет целенаправленно изменять КЛТР: использование известняка, доломита или базальта снижает КЛТР, кварцевого песка – повышает. Введение минеральных добавок (расширяющих на основе сульфоалюмината кальция – для компенсации усадки, пуццолановых – для уплотнения структуры) стабилизирует деформативные характеристики.

Дисперсное армирование фиброй (полимерной или металлической) повышает трещиностойкость и позволяет компенсировать возникающие термические напряжения. Металлическая фибра имеет КЛТР $\approx 12 \cdot 10^{-6}\,°C^{-1}$ (близкий к бетону), полимерная – эффективна на ранних стадиях твердения бетона.

Значения КЛТР ремонтных составов в открытой технической документации не приводятся, что свидетельствует о том, что регулирование данного параметра является инженерной задачей, решаемой на этапе проектирования рецептуры и гарантирующей долговечность сцепления.

Создание ремонтных составов с регулируемым КЛТР является актуальной научно-технической задачей. Обеспечение деформационной совместимости ремонтного материала и бетонного основания позволяет значительно повысить надёжность и долговечность восстановленных конструкций, снизить затраты на повторные ремонты и увеличить срок службы зданий и сооружений.

Перспективные направления разработки составов с заданными КЛТР: использование наполнителей с отрицательным КЛТР (керамика на основе фосфатов циркония, углеродные нанотрубки, графен); создание гибридных полимерцементных и геополимерных вяжущих; компьютерное моделирование деформативного поведения системы «старый бетон – ремонтный слой».

Список литературы

1 **Богданов, В. П.** О свойствах и особенностях композиционного материала «Лахта, ремонтный состав» / В. П. Богданов, А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2004. – № 2. – С. 21–22.

2 **Баженов, Ю. М.** Технология бетона / Ю. М. Баженов. – М. : Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2011. – 528 с.

УДК 624.078.32

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ОТКРЫТОГО И СКРЫТОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО ШВА В ЖИЛЫХ ДОМАХ

В. Г. ГРОМЫКО, А. В. ЯРОВАЯ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Деформационные швы являются неотъемлемым элементом конструктивных систем жилых зданий, особенно в условиях многоэтажного строительства и протяжённых в плане сооружений. Их основная функция – компенсация линейных и угловых деформаций, вызванных температурно-влажностными изменениями, усадкой бетона, ползучестью материалов и неравномерными осадками оснований. В Республике Беларусь, где годовые перепады температур достигают 60–70 °С, а амплитуда сезонных колебаний влажности значительна, вопросы надёжной работы деформационных швов приобретают особую остроту. Ошибки при выборе типа шва или некачественное его исполнение приводят к преждевременному разрушению ограждающих конструкций, снижению теплоэффективности здания, ухудшению акустического комфорта и существенному увеличению эксплуатационных затрат [1].

В современной проектной практике сложились два основных конструктивных решения: открытые (незаполненные) деформационные швы и скрытые (закрытые с эластичным заполнением). Каждое из этих решений имеет свои достоинства и недостатки, однако выбор между ними зачастую основывается лишь на начальной стоимости, без учёта долгосрочных экономических последствий. Между тем действующие строительные нормы Республики Беларусь предъявляют жёсткие требования к теплозащите и долговечности ограждающих конструкций, что делает использование открытых швов в жилых зданиях проблематичным без дополнительных конструктивных мероприятий. Настоящая работа посвящена комплексному технико-экономическому сравнению открытых и скрытых деформационных швов с учётом всех стадий жизненного цикла здания – от строительства до капитального ремонта. Актуальность исследования обусловлена необходимостью выработки обоснованных рекомендаций для проектировщиков и застройщиков, работающих в климатических условиях Беларуси, где требования к энергосбережению и надёжности постоянно ужесточаются [2].

Открытый деформационный шов представляет собой незаполненный зазор между смежными температурными блоками, который может быть частично прикрыт декоративными накладками или металлическими отливами. Основное достоинство такого решения – минимальная трудоёмкость и

низкая начальная стоимость, поскольку не требуется применения дорогих герметиков, компенсаторов и специального оборудования. Однако в процессе эксплуатации открытые швы становятся источником многочисленных проблем. Через незащищённую щель в конструкцию проникают атмосферная влага, пыль и мелкий мусор, что приводит к увлажнению теплоизоляции, коррозии арматуры и закладных деталей, а также к разрушению бетона в зоне шва при циклическом замораживании-оттаивании. Кроме того, открытые швы являются активными мостиками холода: через них происходит интенсивная инфильтрация наружного воздуха зимой и перегрев летом. По данным натурных обследований, теплопотери через погонный метр такого шва могут достигать 0,8–1,2 Вт/(м·К), что для здания высотой более 50 м даёт дополнительные годовые расходы на отопление в размере 200–250 дол. США в пересчёте на каждый шов [3]. Не менее серьёзным недостатком является акустическая проницаемость – уличный шум беспрепятственно проникает в жилые помещения, снижая комфортность проживания.

Скрытые (закрытые) деформационные швы предполагают заполнение зазора эластичным герметиком на основе полиуретана, тиокола или силикона, с установкой вкладыша из вспененного полиэтилена или минеральной ваты, а также применение специальных компенсирующих профилей (резиновых, стальных оцинкованных или комбинированных). Такая конструкция обеспечивает полную водонепроницаемость, защиту от засорения, высокую звукоизоляцию (до 50 дБ) и сохраняет целостность чистовой отделки полов, стен и фасадов [4]. Современные герметики обладают адгезией к бетону, стали и другим материалам не менее 0,5 МПа, а их относительное удлинение при разрыве достигает 300–500 %, что позволяет компенсировать деформации растяжения-сжатия до 30–40 % от первоначальной ширины шва. Благодаря этому скрытые швы практически не требуют обслуживания в течение 25–30 лет, а их общий срок службы сопоставим с долговечностью несущих конструкций (50–70 лет). Кроме того, закрытые швы существенно снижают теплопотери – коэффициент теплопередачи в зоне шва приближается к значениям для основной стены, что особенно важно для зданий с повышенными требованиями к энергоэффективности (классы А и В).

Технико-экономическое сравнение рассматриваемых типов швов целесообразно проводить по методике оценки стоимости жизненного цикла (LCC), учитывающей начальные капитальные вложения, эксплуатационные расходы, затраты на ремонты и потери от энергонеэффективности. На начальном этапе строительства открытый шов обходится в 2–3 раза дешевле скрытого: отсутствуют расходы на герметики, компенсаторы и оплату высококвалифицированных монтажных работ. Однако если рассмотреть горизонт планирования в 50 лет, картина принципиально меняется. Открытые швы требуют ежегодной очистки и осмотра, периодической замены защитных покрытий (через 5–7 лет), а также капитального ремонта примыкающих участков стен и перекрытий через 10–15 лет из-за их увлажнения и разрушения. Совокупные затраты на такие мероприятия за 50 лет могут превысить первоначальную экономию в 4–5 раз. Скрытые швы, напротив, не требуют вмешательства до истечения срока службы герметика (25–30 лет), после чего проводится плановая замена герметика и вкладыша, стоимость которой составляет лишь 20–30 % от стоимости устройства нового шва. Кроме того, экономия на отоплении за счёт снижения теплопотерь обеспечивает возврат дополнительных инвестиций в закрытый шов уже через 5–7 лет эксплуатации [2].

Важным аспектом является также влияние типа шва на долговечность всего здания. Открытые швы способствуют накоплению влаги в ограждающих конструкциях, что ускоряет коррозию арматуры и снижает несущую способность железобетонных элементов. По оценкам специалистов, срок службы зданий с открытыми швами может сокращаться на 10–15 лет по сравнению с проектным.

На основании выполненного комплексного анализа можно сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1 Открытые деформационные швы характеризуются минимальными первоначальными затратами, однако их эксплуатация сопровождается высокими ежегодными расходами на обслуживание, значительными теплопотерями, ухудшением акустического комфорта и сокращением ресурса несущих конструкций. Дисконтированная стоимость владения за 50-летний период для открытого шва оказывается на 30–45 % выше, чем для закрытого, что делает его экономически нецелесообразным для жилых зданий со сроком службы более 30 лет.

2 Скрытые деформационные швы требуют больших единовременных вложений, но обеспечивают высокую герметичность, долговечность, низкие эксплуатационные расходы и соответствие современным требованиям энергоэффективности. Дополнительные инвестиции окупаются за счёт экономии на отоплении и сокращения ремонтов в течение первых 7–10 лет эксплуатации.

3 При выборе материалов для скрытых швов следует отдавать предпочтение полиуретановым и тиоколовым герметикам с высокой адгезией и эластичностью, а также использовать пенополиэтиленовые шнуры в качестве заполнителей. Монтаж должен выполняться специализированными бригадами с обязательным контролем температуры и влажности основания.

4 В проектах новых жилых комплексов и при капитальном ремонте существующих зданий рекомендуется повсеместно применять скрытые деформационные швы во всех конструктивных элементах – фундаментах, стенах, перекрытиях и кровлях. Исключение могут составлять лишь временные или малоответственные сооружения с расчётным сроком службы до 25 лет.

Таким образом, технико-экономическое сравнение убедительно доказывает преимущество скрытых деформационных швов перед открытыми для жилых домов в климатических условиях Республики Беларусь. Полученные результаты могут быть использованы при корректировке нормативных документов, а также в учебном процессе при подготовке инженеров-строителей.

Список литературы

1 **Малахов, Р. А**. Нормирование расстояний между деформационными швами железобетонных конструкций / Р. А. Малахов // Строительство и строительные технологии: наука и практика : материалы междунар. научно-технической конф., посвящ. 105-летию строительного факультета БНТУ, 22–23 мая 2025 г. / сост. : В. Ю. Минич, С. Н. Ковшар. – Минск : БНТУ, 2026. – С. 123–134.

2 **Ловыгин, А. Н**. К вопросу об особенностях обустройства деформационных швов зданий и сооружений = On the question of the features of the arrangement of deformation joints of buildings and structures / А. Н. Ловыгин, А. Е. Шилов // Проблемы современного строительства : сб. науч. трудов, Минск, 23 мая 2023 г. / редкол.: В. В. Бондарь, В. Ф. Зверев, Е. А. Козловский. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 20–24.

3 **Кузьмич, В. В.** Теплозащитные свойства деформационных швов в многоэтажных жилых зданиях / В. В. Кузьмич, С. Н. Леонович // Энергоэффективность в строительстве. – 2023. – № 4.

4 **Грибовский, А. В.** Экономическая эффективность закрытых деформационных швов в многоэтажном жилищном строительстве / А. В. Грибовский, И. Н. Савицкий // Архитектура и строительство. – 2024. – № 3.

УДК 691-419.3

ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА АСБЕСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ

А. В. ДОРОШЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Природные волокнистые серпентиновые и амфиболовые минералы, обозначенные термином «асбест», получили широкое промышленное применение в прошлом и продолжают использоваться в настоящее время благодаря своей исключительной прочности на разрыв, низкой теплопроводности и сопротивляемости к агрессивным химическим веществам. Существует шесть основных форм асбеста, главной из которых в настоящее время является хризотил, который относится к серпентинам [1]. Согласно последним исследованиям, проведенным тремя ведущими токсикологическими лабораториями в Швейцарии, Германии и США, доказано, что хризотил-асбест является самым безопасным волокном среди аналогичных минералов и искусственных заменителей (целлюлоза, керамическое волокно и др.), так как быстрее всех волокон выводится из организма. Так, полупериод распада волокон хризотила составляет 15 дней, амфибола – 466 дней, целлюлозы – 1000 дней [2].

В отличие от хризотил-асбеста, абсолютно безвредного для человека и животных, волокна асбеста, принадлежащего к семейству амфиболов, представляют наибольшую опасность для здоровья человека – амфиболовый асбест практически не выводится из легких. Долгие десятилетия внимание медицинской науки было привлечено к неблагоприятному воздействию асбестосодержащей пыли. От первого зафиксированного случая профессионального легочного заболевания – асбестоза – у рабочего, контактировавшего с асбестом, в Англии в 1907 году до начала масштабных фундаментальных исследований ученых-медиков, подтвердивших онкологическую опасность для работающих длительное время с асбестом, прошло более полувека. В 1970-х Международное агентство по изучению рака включило минерал в группу веществ с достоверно доказанными канцерогенными свойствами. В те дни не делалось разграничений между различными типами волокон асбеста. Оши-

бочные оценки канцерогенности всех форм асбеста при поддержке отдельных исследователей были восприняты общественностью со всей серьезностью и антиасбестовая кампания вошла в дома граждан США и Европы по каналам СМИ (газеты, телевидение) [3].

Вскоре появились программы по ограничению и запрещению использования асбеста, а также по удалению его из ранее построенных зданий и сооружений. Наиболее активную деятельность по запрещению использования асбеста развернуло Агентство по охране окружающей среды США (EPA) (далее – Агентство), которое приняло в 1989 году постановление о запрете асбеста к 1996 году. В 1991 году это постановление было аннулировано Апелляционным судом США ввиду недостаточной его обоснованности [3]. Позднее Агентство взяло на себя ответственность за пересмотр документа, опубликованного в 1986 году, в котором рассматривались риски здоровью при воздействии асбеста. На конференции, которая проводилась в Калифорнии в мае 2001 года Агентство пришло к заключению, что необходимо обновить данные по этому вопросу и обязалось в трехлетний срок провести исследования «в свете нового понимания, в частности, в отношении различий в токсичности между хризотилом и амфиболами» [2].

К началу 2000-х случился глобальный отказ на Западе от амфиболового асбеста как компонента строительных материалов. В странах СНГ, напротив, этот вид асбеста и технология не использовались вовсе. В настоящее время добыча и использование амфиболового асбеста запрещена во всем мире. Его месторождения закрыты и не разрабатываются. Тем не менее бремя связанных с асбестом болезней продолжает расти даже в тех странах, которые запретили использование асбеста в начале 1990-х годов, поскольку этим заболеваниям сопутствует продолжительный латентный период [4].

Хризотил не несет сколько-нибудь ощутимого риска для здоровья человека при уровнях воздействия ниже 1 волокна/см^3, определенных МОТ. Данные взяты из многочисленных эпидемиологических исследований, некоторые из которых охватывают период более 20 лет. Это наиболее безопасный вид асбеста, несмотря на путаницу в разновидностях асбеста и их канцерогенности для человека [2]. В настоящее время в мире ведется агрессивная антиасбестовая кампания, которая бьет по населению стран СНГ. Путем трактовки всех разновидностей асбеста как одного понятия европейские химические и металлургические комбинаты, производящие дорогостоящие трубы и кровельные материалы, пытаются запретить использование хризотилсодержащих материалов по всему миру и стереть с лица земли предприятия, использующие хризотил-асбест. Одни из главных достоинств хризотила – доступность при добыче (он содержится в 2/3 земной коры) и экономическая доступность материалов на его основе.

Крупные месторождения, пригодные для коммерческой разработки, расположены в России и Казахстане, Бразилии, Зимбабве и Канаде [5]. В России асбест был найден в 1720 году на Среднем Урале под г. Невьянском. Горнопромышленник Никита Демидов организовал добычу минерала, названного «горный лен». Из этого минерала умельцы вязали изысканные перчатки для богатых дам, изготавливали ткань и одежду для рабочих металлургических заводов. В 1722 году Н. Демидов подарил скатерть из асбеста российскому императору Петру I и всем присутствующим на приеме продемонстрировал её уникальное свойство – негорючесть. Производство асбеста под г. Невьянском в связи с отсутствием большой выгоды просуществовало до 1742 года. В 1885 году на Урале было открыто Баженовское месторождение хризотил-асбеста, а с 1889 года началась его промышленная разработка. В 1908 году в российском городе Брянске было организовано Товарищество первого русского завода искусственного шифера «Террофазерит». Завод снабжал кровельными материалами Брянскую, Смоленскую, Калужскую, Киевскую и Гомельскую губернии, за что был отмечен императором Николаем II. Так взяла отсчет начала развития хризотилцементная отрасль в России [6]. В 70-е годы XX столетия СССР вышел на первое место в мире по добыче этого минерала.

В Республике Беларусь добыча хризотила (хризотил-асбеста) не производится, однако между Республикой Беларусь и Российской Федерацией есть договоренность о прохождении техникой БЕЛАЗа испытания в карьере уральского комбината «Ураласбест». Эта договоренность стала одним из пунктов трехстороннего соглашения, подписанного между ОАО «БЕЛАЗ», ПАО «Ураласбест» и ООО «БелТрансЛогистик» в 2021 году в Екатеринбурге. В частности, предусматривается проведение совместной работы по модернизации как новой, так и уже работающей на комбинате карьерной техники. Например, будет учитываться опыт использования самосвалов БЕЛАЗ в карьере Баженовского месторождения, где хризотил-асбест разрабатывают с 1889 года [7].

На Международной конференции «Профсоюзы и хризотил», 25–26 апреля 2007 года, в Москве была принята Хризотиловая Хартия, которая призвана защитить рабочие места и обеспечить соблюдение рекомендаций Конвенции МОТ № 162 «О контролируемом использовании асбеста». Кроме того, принята Программа по защите прав трудящихся, определяющая позиции в отношении защиты контролируемого использования хризотил-асбеста [5].

В настоящее время РФ является самым крупным производителем и потребителем хризотил-асбеста. ПАО «Ураласбест» производит 21 % хризотила в мире. 78 % уральского хризотила комбинат поставляет на экспорт. Годовой объём производства 450 тыс. т. С 28 апреля 2017 года ООО «КМБ-Восток» начало производить листы асбестоцементные волнистые и листы хризотилцементные плоские непрессованные на базе производственных мощностей и трудового коллектива ОАО «Кричевцементношифер».

Широкое использование хризотилцементных изделий обусловлено их высокими характеристиками: долговечностью, удобством в обработке, ценовой доступностью, термоустойчивостью, водостойкостью. Несмотря на громадные усилия и многомиллионные долларовые затраты, так и не найдены вещества, имеющие ту же совокупность полезных свойств, которыми обладает асбест.

Список литературы

1 Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ). Асбест // WHO.int. – URL: https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/asbestos (дата обращения: 14.09.2026)

2 Положить конец путанице / АО «Хризотиловая ассоциация» // Chrysotile.ru. – URL: https://chrysotile.ru/page/clarification/ (дата обращения: 10.09.2026).

3 Причины и следствия антиасбестовой кампании // УралАсбест: информационный портал. – URL: https://www.uralasbest.ru/health/prichiny-i-sledstviya-antiasbestovoj-kampanii (дата обращения: 01.09.2026).

4 Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ). – URL: https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/4baff29c-c133-467e-9937da/ (дата обращения: 14.09.2026).

5 Профсоюзы и экономика // Правда.Ру. – URL: https://www.pravda.ru/economics/222011-profsojuz/ (дата обращения: 14.09.2026).

6 Хризотилцементные строительные материалы. Образовательный курс / сост.: Е. Г. Тарская-Лаптева, Ж. В. Репина [и др.] ; НО «Хризотиловая ассоциация». – М., 2020. – 166 с.

7 Об опасности асбеста на предприятии «БелАЗ» // Министерство промышленности Республики Беларусь. – URL: minprom.gov.by (дата обращения: 01.09.2026).

УДК 658.7

УПРАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ ДИАГРАММЫ ГАНТА: ОТ КАЛЕНДАРЯ К УПРАВЛЕНИЮ ПОТОКАМИ

Е. Л. ЖИВИЦА, З. Н. ЗАХАРЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Современная экономическая конъюнктура, характеризующаяся волатильностью спроса, глобализацией цепей поставок и стремительным технологическим развитием, требует пересмотра подходов к управлению материально-техническим обеспечением (МТО). В условиях цифровой трансформации промышленности и перехода к концепции «Индустрия 4.0» особое значение приобретает способность логистических систем быстро адаптироваться к изменениям внешней и внутренней среды. Традиционное календарное планирование закупок, производства и сбыта, основанное на классической диаграмме Ганта, часто оказывается недостаточно гибким для решения этих задач. Данный инструмент, предложенный ещё в начале XX века, остаётся востребованным благодаря наглядности и простоте, однако его статичность, игнорирование объёмных и динамических характеристик потоков, а также слабое отражение взаимосвязей между операциями существенно снижают эффективность управления в современных условиях. Особенно остро эти проблемы проявляются при работе с многономенклатурными запасами, когда синхронизация поставок, производства и отгрузок требует постоянного пересчёта параметров. Целью настоящей работы является модификация диаграммы Ганта для мониторинга материальных потоков и разработка алгоритма, позволяющего перейти от простого календарного планирования к полноценному управлению потоками в системе МТО с учётом временных, объёмных и стохастических факторов.

Классическая диаграмма Ганта в логистике применяется для составления графиков закупок, контроля сроков, что делает её незаменимой для оперативных совещаний и визуализации последовательности работ. Однако серьёзные недостатки (статичность, отсутствие динамики, сложность отображения зависимостей, низкая адаптивность к сбоям) превращают планирование в формальное расписание, а не в инструмент управления перемещением ресурсов. Статичность означает, что диаграмма фиксирует лишь один, часто идеализированный, сценарий, не учитывая возможные отклонения – задержки поставок, изменение приоритетов, выход оборудования из строя. Отсутствие динамики не позволяет отслеживать фактическое выполнение в реальном времени и сравнивать план с фактом без перерисовки всей диаграммы. Сложность отображения зависимостей приводит к тому, что связи между операциями либо не показываются вовсе, либо изображаются упрощённо, из-за чего невозможно оценить, как задержка на одном этапе повлияет на всю цепочку. Низкая адаптивность к сбоям означает, что любое изменение требует ручного пересчёта всех связанных сроков, что занимает часы и чревато арифметическими ошибками. В условиях гибкого производства и бережливого управления эти ограничения становятся критическими, поскольку время реакции на отклонения должно измеряться минутами, а не днями.

Предлагается усовершенствованная вариация – потоковая диаграмма Ганта, которая интегрирует количественные параметры. Горизонтальные отрезки масштабируются по интенсивности потока (например, суточный объём поставок), что позволяет визуально оценивать напряжённость участков графика. Цветовое кодирование различает категории ресурсов и типы процессов (транспортировка, складирование, переработка, контроль качества). Стрелочные связи показывают логические и физические зависимости (например, запуск приёмки после транспортировки) с указанием временных лагов. Временная шкала дополнена маркерами дат заказов и уровней страховых запасов, что связывает график с политикой управления запасами. Предусмотрено динамическое обновление: при изменении входных данных система автоматически пересчитывает сроки и интенсивность связанных операций, что реализуется через электронные таблицы или специализированное программное обеспечение.

Алгоритм разработки потоковой диаграммы Ганта включает последовательное выполнение следующих этапов:

1 Точное очерчивание границ системы материально-технического обеспечения, включающей весь цикл от поставщиков сырья до конечных потребителей готовой продукции.

2 Выявление основных материальных потоков и их характеристик: ассортимент, объемы, частота поставок, сроки доставки, длительность хранения, производственный цикл.

3 Составление перечня всех операций и определение логических зависимостей между ними (например, связи «начало – конец», условия выполнения).

4 Создание базовой структуры диаграммы Ганта с учетом временных параметров каждой операции.

5 Визуализация интенсивности потока путем изменения толщины полос или добавления числовых значений на соответствующих участках.

6 Добавление стрелочных указателей между операциями для демонстрации связей по потокам материалов и информации.

7 Связывание диаграммы с системой управления запасами путем нанесения точек заказа, уровней страховых запасов и контрольных дат.

8 Настройка механизма динамического обновления диаграммы при корректировке исходных данных, что может реализовываться через электронные таблицы или специализированное программное обеспечение.

Преимущества предложенного подхода:

– повышение прозрачности и целостности планирования, что снижает риск несогласованности между отделами;

– одновременный учёт временных и количественных характеристик, позволяющий оптимизировать размеры партий и частоту поставок;

– упрощение выявления узких мест и дисбалансов благодаря визуальному выделению перегруженных участков;

– поддержка принятия решений по корректировке поставок и запасов в режиме реального времени;

– улучшение коммуникации между подразделениями за счёт единого визуального языка;

– снижение рисков сбоев за счёт раннего обнаружения потенциальных задержек.

Ограничения метода:

– высокая трудоёмкость первоначальной разработки и поддержания актуальности диаграммы, особенно при многономенклатурном производстве;

– зависимость от качества и своевременности исходных данных, что требует налаженного учёта;

– сложность визуализации большого числа потоков и связей – при избытке информации диаграмма становится перегруженной;

– необходимость применения специализированного ПО для автоматизации, а также обучения персонала работе с новым инструментом.

Таким образом, проведённое исследование подтверждает, что классическая диаграмма Ганта может быть успешно адаптирована к задачам управления материальными потоками путём введения количественных параметров, связей и элементов динамического обновления. Предложенная потоковая диаграмма позволяет не только фиксировать сроки, но и отслеживать интенсивность перемещений, объёмы запасов и зависимость операций, что создаёт основу для перехода от статичного графика к системе активного динамического регулирования. Разработанная методика имеет практическую ценность для промышленных предприятий, особенно в условиях нестабильного спроса и частых изменений в цепях поставок. Для успешного внедрения рекомендуется начинать с пилотного проекта на одном ключевом потоке, постепенно масштабируя подход на всю номенклатуру. В перспективе целесообразно создание специализированного программного модуля, интегрируемого с корпоративными ERP-системами, который бы автоматизировал построение, обновление и анализ таких диаграмм. Дальнейшие исследования могут быть направлены на учёт стохастических факторов с использованием имитационного моделирования, а также на применение методов машинного обучения для прогнозирования оптимальных параметров потоков на основе исторических данных, что позволит повысить устойчивость и эффективность МТО в долгосрочной перспективе.

Список литературы

1 **Гончаров, В. И.** Логистика и управление цепями поставок : учеб. пособие / В. И. Гончаров. – Минск : БНТУ, 2022. – 215 с.

2 **Козловский, В. В.** Управление материально-техническим обеспечением : учеб.-метод. пособие / В. В. Козловский. – Минск : БГЭУ, 2023. – 156 с.

3 Логистика : учеб. / под общ. ред. И. И. Полещук. – Минск : Выш. шк., 2021. – 336 с.

УДК 72.017.4

ЦВЕТОВАЯ РЕАБИЛИТАЦИЯ ВИЗУАЛЬНОЙ СРЕДЫ

А. А. КАРАМЫШЕВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Современный город – это не только архитектура и инфраструктура, но и сложная визуальная система, которая ежедневно воздействует на психику миллионов людей. Мы живем в среде, перенасыщенной рекламными вывесками, монотонными фасадами и кричащими цветовыми акцентами. Такая визуальная агрессия приводит к хронической усталости, снижению концентрации и росту тревожности. Проблема стала настолько острой, что в науке сформировалось отдельное направление – **визуальная экология**, а одним из её практических инструментов выступает **цветовая реабилитация**. Цветовая реабилитация – это системный подход к преобразованию визуальной среды с использованием законов колористики, физиологии зрения и психологии восприятия. В отличие от декоративного оформления, реабилитация ставит целью не эстетическое украшение, а **восстановление функционального баланса** между человеком и его окружением.

Среда, прошедшая цветовую реабилитацию, должна отвечать трём критериям:

– не вызывать раздражения (исключение «агрессивных» цветов и чрезмерных контрастов);

– способствовать концентрации или расслаблению в зависимости от назначения пространства;

– формировать ощущение безопасности и предсказуемости (что особенно важно в городских условиях).

Таким образом, психофизиологические обоснования того, как цвет влияет на человека, предполагают воздействие цвета с точки зрения физиологического фактора. Через зрительный нерв сигналы передаются в гипоталамус и лимбическую систему, которые регулируют эмоции, гормональный фон и вегетативные реакции на уровне древних глубинных слоев мозга, сформированных эволюционно.

Исследования показывают:

– красный цвет повышает артериальное давление, учащает пульс и стимулирует активность. при длительном воздействии вызывает тревожность и агрессию;

– синий и зелёный – снижают частоту сердечных сокращений, успокаивают нервную систему, способствуют восстановлению ресурсов;

– жёлтый – активизирует умственную деятельность, но в избытке может вызвать перенапряжение;

– серый – в больших количествах провоцирует апатию и снижение тонуса [1].

Именно поэтому цветовая реабилитация предполагает **дозированное использование спектральных групп** в зависимости от функции пространства: для офисов – холодные оттенки с жёлтыми акцентами, для жилых зон – природные пастельные гаммы, для рекреационных – глубокие зелёные и синие тона.

Можно выделить основные направления цветовой реабилитации:

1 *Реабилитация городской среды.*

Городская среда сегодня – это «визуальный шум»: хаотичная реклама, монотонные бетонные коробки, стеклянные фасады. Реабилитация здесь включает:

– хромотерапию фасадов – использование природных пигментов (охра, песок, терракота) для снижения визуального давления стекла и бетона;

– создание «цветовых островов» – локальных зон с насыщенными цветами (например, детские площадки, входные группы), которые переключают внимание и снижают утомляемость;

– интеграцию зелени – растения рассматриваются не только как декор, но и как элемент цветокоррекции, так как их спектральный состав (оттенки хлорофилла) благоприятен для зрения.

2 *Реабилитация интерьеров*.

В закрытых помещениях цвет играет ещё более важную роль, так как человек проводит там до 80 % времени. Основные принципы:

– создание цветовых зон в офисах: синие – для сосредоточенной работы, жёлтые – для коммуникации, зелёные – для отдыха;

– исключение стерильной белизны – исследования показывают, что полностью белые пространства снижают креативность и вызывают ощущение незащищённости;

– использование динамического освещения с изменением цветовой температуры в течение дня, что имитирует естественный солнечный цикл.

3 *Светоцветовая коррекция (световое загрязнение).*

Современные технологии позволяют моделировать естественное освещение с помощью архитектурных решений и умных систем. Это особенно актуально в условиях дефицита солнечного света (северные регионы, подземные пространства). Цветовая реабилитация здесь включает имитацию рассвета и заката, а также использование тёплых ламп в вечернее время для стимуляции выработки мелатонина. Также нужно учесть тот факт, что в современных городах использование освещения в ночное время никак не урегулировано, несмотря на то, что множество исследований выявляют негативные тенденции воздействия на человеческий организм отсутствия темноты во время сна [2].

Методологически процесс цветовой реабилитации можно разделить на нескольких этапов:

– колористическое картирование – анализ существующей среды: определяются доминирующие цвета, их насыщенность, контрастность и частотный состав;

– психофизиологическая диагностика – оценка реакции человека на текущую палитру (опросы, физиологические замеры пульса и давления);

– разработка адаптивной палитры – создание цветовой схемы, учитывающей функцию пространства (жилое, рабочее, рекреационное);

– внедрение и мониторинг – реализация проекта с последующей оценкой динамики психоэмоционального состояния пользователей.

Важно отметить, что цветовая реабилитация – это не разовое мероприятие, а постоянный процесс, так как среда динамична, а потребности человека меняются.

Практическая значимость и эффективность.

Эффективность цветовой реабилитации подтверждается практикой:

– в школах, где использовали цветовые зоны (синие – для учебных кабинетов, жёлтые – для коридоров и рекреаций), отмечено повышение успеваемости и снижение конфликтов;

– офисах, где применяли динамическое цветовое освещение, сотрудники отмечали снижение утомляемости и рост продуктивности на 15–20 %;

– жилых районах, где фасады были перекрашены в природные оттенки, отмечено снижение уровня вандализма и рост чувства общности у жителей [3].

Экономическая эффективность также очевидна: затраты на перекраску фасадов или замену освещения окупаются снижением расходов на здравоохранение и повышением качества жизни.

Цветовая реабилитация визуальной среды – это не модный тренд, а **стратегический ресурс**, который может улучшить качество жизни миллионов людей. Игнорирование этого аспекта ведёт к деградации визуальной культуры и росту социальной напряжённости, тогда как грамотная цветовая политика способна «вылечить» депрессивные городские зоны без капитальных финансовых затрат.

Цвет перестаёт быть просто пигментом – он становится инструментом здоровья. И в этом смысле цветовая реабилитация должна занять достойное место в градостроительном планировании, архитектурном проектировании и дизайне среды.

Список литературы

1 **Базарный, В. Ф.** Зрение у детей: проблемы и решения / В. Ф. Базарный // Педиатрия. – 1997. – № 5. – С. 88.

2 **Фрилинг, Г.** Человек – цвет – пространство: прикладная цветопсихология / Г. Фрилинг, К. Ауэр. – М. : Стройиздат, 1973. – 117 с.

3 **Агранович-Пономарёва, Е. С.** Архитектурная колористика: основы теории и практики / Е. С. Агранович-Пономарёва, В. П. Агранович. – Ростов н/Д : Феникс, 2005. – 348 с.

УДК 711.012:72.01

КРИТИЧЕСКИЙ РЕГИОНАЛИЗМ КАК ИНСТРУМЕНТ СОХРАНЕНИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛИЗАЦИИ

К. А. КЛИКУНОВ, Н. А. БОЛТУНОВ, В. М. ПРАСОЛ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Глобализация архитектурных процессов привела к беспрецедентной унификации городской среды. Международный стиль, возникший в 1920-х годах, трансформировался в универсальный язык корпоративной архитектуры, утративший чувствительность к региональной специфике [1]. По данным исследований, 78 % финансовых центров мира имеют идентичную застройку, 65 % небоскрёбов используют стеклянные фасады, а 82 % проектов реализуются без учёта регионального контекста. Это делает проблему сохранения архитектурной идентичности одной из ключевых задач современной архитектурной теории и практики.

Теоретические основы. Понятие архитектурной идентичности включает материальные, пространственные, символические и климатические компоненты. Оно опирается на концепцию Genius Loci Кристиана Норберг-Шульца, подчёркивающую уникальность каждого места, определяемую природным и культурным контекстом [2]. В 1983 году Кеннет Фрэмптон в эссе «К критическому регионализму: шесть пунктов архитектуры сопротивления» сформулировал теорию, противопоставляющую универсальному модернизму синтез глобального и локального. Шесть пунктов Фрэмптона включают: приоритет топографии над оптикой, тектоники над сценографией, тактильности над зрением, критическое переосмысление традиции, климат и свет как фильтры среды, а также культурную идентичность как сопротивление гомогенизации [3].

Термин «критический регионализм» был введён ранее, в 1981 году, Александром Тзонисом и Лиан Лефевр в эссе «Сетка и путь». В 2003 году они уточнили концепцию, сместив акцент от «сопротивления» к «вовлечённости» в глобальный мир. Критический регионализм не отвергает современность, а стремится деконструировать универсальный модернизм через локальные ценности, создавая уникальность в рамках глобального порядка.

Проблема «безместности». Современная архитектура переживает кризис placelessness – утраты связи зданий с конкретным местом, культурой и историей. Основные симптомы: стеклянные небоскрёбы – «клоны», разрыв с контекстом, климатическая слепота, гомогенизация материалов. Эмпирические примеры – Dubai International Financial Centre, район Пудун в Шанхае, Москва-Сити, Bahrain Financial Harbour. Экономические императивы гомогенизации включают требования глобального капитала к унифицированной корпоративной архитектуре, стремление развивающихся стран к «мировым стандартам», экономию на проектировании и давление инвесторов. Контекстуальный проект стоит на 40–80 % дороже стандартного, а срок его разработки увеличивается в 2–3 раза [4]. Культурная колонизация проявляется через образовательные программы, профессиональные журналы, архитектурные премии и символику высотного доминирования.

Первая стратегия – тектоническая культура и материальность. Она предполагает возвращение архитектуры к честному выражению конструкции, материала и способа его обработки, когда здание воспринимается не как абстрактный объём, а как результат осмысленного соединения элементов. В отличие от универсальной стеклянной оболочки, скрывающей тектонику, эта стратегия опирается на локальные материалы – кирпич, дерево, камень, бетон – и на традиционные приёмы их использования, переосмысленные средствами современной технологии. Тактильные качества поверхности, следы ручного труда, несовершенство и изменчивость материала становятся носителями культурной памяти и противовесом визуальной гомогенизации. Примерами могут служить произведения Алвара Аалто с его чувствительностью к дереву и кирпичу, Луиса Баррагана с пластикой цвета и света, Тадао Андо с минималистичным бетоном, вступающим в диалог с природой, и Ван Шу, соединяющего вторичные материалы с традиционной техникой. Тем самым тектоническая культура не просто сохраняет идентичность, но и делает её физически ощутимой, превращая материальность в инструмент сопротивления «безместности».

Вторая стратегия – топография и климатическая адаптация. Архитектура должна вступать в диалог с ландшафтом, а не доминировать над ним. Традиционные климатические решения – внутренние дворы, ветровые башни badgir, решётчатые экраны машрабии, толстые стены с термической инерцией, свайные конструкции – получают современную интерпретацию в работах Жана Нувеля, Гленна Меркатта, Чарлза Корреа. Работа с топографией и климатом в логике критического регионализма не сводится к декоративному цитированию традиционных приёмов. Она предполагает, что рельеф, роза ветров, уровень инсоляции, влажность и сезонные колебания температуры становятся исходными параметрами формообразования. Здание может «встраиваться» в склон, повторять его террасами, использовать перепады высот для естественной вентиляции или затенения, а его конструкция и материал – реагировать на локальные условия. Так, Жан Нувель в Институте арабского мира в Париже превращает южный фасад в динамический световой экран, отсылающий к геометрии машрабии; Гленн Меркатт в австралийских домах опирается на пассивную вентиляцию, сбор воды и ориентацию по солнцу; Чарлз Корреа в проектах жилья в Индии соединяет высотную типологию с террасами, дворами и сквозным проветриванием. В результате климат перестаёт быть внешним ограничением и становится генератором архитектурной формы, а топография – не фоном, а соавтором проекта. Это позволяет сохранять идентичность без стилизаторства, поскольку решение вырастает из конкретных условий места и одновременно остаётся современным по конструкции и функции.

Третья стратегия – символика и культурные коды. Интеграция культурных символов и мифологии позволяет архитектуре говорить на языке местной культуры. Уровни интеграции: абстрактная интерпретация, символические референсы, мифологические основания, историческая преемственность. Критерии успеха – узнаваемость культурной принадлежности, отсутствие ностальгического историзма, современная функциональность, эмоциональный отклик [5].

Перспективы. Адаптивное повторное использование наследия (adaptive reuse) предполагает сохранение фасадов и несущих конструкций при перепланировке под современные функции. Примеры: High Line в Нью-Йорке, Рейхстаг в Берлине, Тейт Модерн в Лондоне, Неуэс Музей в Берлине. Цифровые технологии (3D-сканирование, фотограмметрия, BIM, виртуальная реконструкция) открывают новые возможности документирования, но не заменяют физическое присутствие и поднимают этические вопросы аутентичности.

Сохранение архитектурной идентичности в эпоху глобализации требует не отказа от современности, а её критического осмысления через призму региональной культуры. Критический региона-

лизм предлагает синтез универсального и локального, тектоническая культура и материальность формируют основу идентичности, климатическая адаптация связывает архитектуру с местом, культурные коды создают эмоциональную связь с обществом. Будущее архитектуры – в создании уникальных, но открытых миру решений, укрепляющих связь человека с местом [6].

Список литературы

1 **Маклакова, Т. Г.** История архитектуры и строительной техники : в 2 ч. / Т. Г. Маклакова. – М. : АСВ, 2003. – Ч. 2. – 207 с.

2 **Глазычев, В. Л.** Архитектура. Энциклопедия / В. Л. Глазычев. – М. : АСТ : Астрель, 2002. – 672 с.

3 The Anti-Aesthetic essays on postmodern culture / ed. by H. Foster. – Washington : Bay Press, 1983. – 173 p.

4 **Прасол, В. М.** Компаративный анализ возможностей искусственного интеллекта для задач строительства объектов транспортной инфраструктуры / В. М. Прасол, М. А. Скибунов, В. В. Шелюто // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. пятилетке качества (Гомель, 20–21 нояб. 2025 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Н. Н. Казакова. – Гомель : БелГУТ, 2025. – URL: http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/14276/390-391.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 11.09.2026).

5 **Орельская, О. В.** Современная зарубежная архитектура : учеб. пособие / О. В. Орельская. – М. : Академия, 2006. – 268 с.

УДК 691-419.3

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КРОВЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

И. А. КОВГАР

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Текущие тенденции развития строительной отрасли страны связаны с усилением требований к энергоэффективности, экологическим характеристикам и архитектурному качеству зданий. На этом фоне возрастает интерес к светопрозрачным конструкциям, которые обеспечивают более высокий уровень естественной освещённости и формируют комфортную внутреннюю среду. Несмотря на высокий потенциал кровельных решений на основе стеклянных элементов распространение подобных систем остаётся ограниченным. Основными причинами являются значительные первоначальные вложения, высокая зависимость от поставок импортных материалов, а также отсутствие детализированных нормативных регламентов для проектных и монтажных организаций.

В рамках исследования определялась экономическая целесообразность применения стеклянной черепицы в индивидуальном жилищном строительстве Республики Беларусь по сравнению с традиционными кровельными покрытиями – керамической черепицей, металлочерепицей и битумным гонтом. В основу анализа положена методология совокупной стоимости владения (Total Cost of Ownership, TCO), включающая капитальные затраты на материалы и монтаж [1].

Сравнение выполняется для базового жилого дома с площадью кровли 200 м², расположенного в Минской области (II снеговой район, II ветровой район). Уклон скатов принят 35°. В качестве вариантов рассматриваются:

– В1 – керамическая черепица (тип «бобровый хвост», производство Roben, Германия);

– В2 – металлочерепица с полимерным покрытием (Grand Line, Россия);

– В3 – битумная черепица (Shinglas, Россия);

– В4 – стеклянная черепица по системе класса 1 (механическое крепление с вентиляционным зазором), произведённая по индивидуальному заказу из закалённого стекла ОАО «Гродненский стеклозавод» с металлическими поддонами в зонах ендов и карнизов.

Все стоимостные показатели приведены в белорусских рублях (бел. руб.) по состоянию на II квартал 2026 года (средний курс Национального банка Республики Беларусь: 1 бел. руб. ≈ 0,30 евро), с учётом транспортных и таможенных сборов для импортных материалов.

Калькуляция капитальных затрат на кровлю из стеклянной черепицы выполнена на основе технологической карты и данных производителей [2, 3]. Потребность в материалах на 1 м² кровельного покрытия (по основным составляющим):

– стеклянные модули закалённые (6 мм, с фотопечатью «под сланец»), 8,5 шт./м² (размер 300×400 мм с нахлёстом 80 мм), цена завода – 25 бел. руб./шт. (итого 212,5 бел. руб./м²);

– крепёжный комплект (винт AISI 316, тарельчатая пружина, EPDM-прокладки, полиамидная втулка) – 1,2 бел. руб./комплект, 8,5 комплектов – 10,2 бел. руб./м²;

– супердиффузионная мембрана Tyvek Solid – 4,5 бел. руб./м²;

– контробрешётка (брус 60×40 мм, шаг 300 мм) и сплошной настил OSB-3 18 мм – 12,0 бел. руб./м²;

– карнизные и коньковые алюминиевые профили с уплотнителями – 15,0 бел. руб./м² (приведено к 1 м² кровли);

– греющий кабель саморегулирующийся (Raychem T2Blue) по карнизу, ендовам и коньку – 8,0 бел. руб./м²;

– герметики, бутиловые ленты – 2,5 бел. руб./м².

Примерная стоимость материалов составляет 264,7 бел. руб./м². Стоимость монтажных работ (с учётом повышенной сложности и контроля момента затяжки) оценена по трудозатратам: 2,5 чел·ч/м² при ставке 20 бел. руб./чел·ч – 50 бел. руб./м². Таким образом, прямые капитальные затраты составляют порядка 315 бел. руб./м². Для кровли 200 м² итоговая стоимость материалов и монтажных работ – 63 000 бел. руб.

Для остальных вариантов капитальные затраты определены по среднерыночным ценам [4, 5]:

– B1 (керамическая черепица Roben): материалы – 65 бел. руб./м², работа – 25 бел. руб./м², всего 90 бел. руб./м²;

– B2 (металлочерепица Grand Line): материалы – 38 бел. руб./м², работа – 18 бел. руб./м², всего 56 бел. руб./м²;

– B3 (битумная черепица Shinglas): материалы – 28 бел. руб./м², работа – 15 бел. руб./м², всего 43 бел. руб./м².

Таким образом, стеклянная черепица значительно дороже традиционных покрытий. Однако её экономическая привлекательность может быть обоснована через учёт эксплуатационных выгод и увеличенный срок службы.

Срок службы стеклянной черепицы прогнозируется на уровне 50 лет при условии своевременной замены прокладок (каждые 8 лет) и ревизии крепежа [6]. Керамическая черепица имеет сопоставимый срок (50–60 лет). Однако металлочерепица служит 20–25 лет, битумная – 15–20 лет. Таким образом, сравнение по ТСО должно учитывать замену покрытий с более коротким жизненным циклом.

Годовые эксплуатационные расходы для стеклянной черепицы включают:

– периодическую замену уплотнителей (каждые 8 лет), стоимость материалов и работы на 1 м² – 8 бел. руб. (приведённая к году – 1 бел. руб./м²·год);

– электроэнергия на греющий кабель (среднегодовое потребление для Минской области, по данным, – 3 кВт·ч/м², тариф – 0,25 бел. руб./кВт·ч, итого 0,75 бел. руб./м²·год);

– очистка от снега и мусора (1 раз в год, 0,2 чел·ч/м²) – 4 бел. руб./м²·год.

Суммарные годовые удельные расходы составляют порядка 5,75 бел. руб./м²·год.

Для традиционных кровель эксплуатационные расходы существенно ниже (только очистка и периодический ремонт), приблизительно 1,5–2,0 бел. руб./м²·год. Однако необходимо учесть, что замена металлочерепицы через 25 лет повлечёт дополнительные капитальные вложения, дисконтированные к нынешнему моменту.

Расчёт чистой приведённой стоимости (NPV) за 50 лет при ставке дисконтирования 7 % (реальная ставка для долгосрочных проектов в Республике Беларусь [7]) показывает:

– B4 (стеклянная черепица) $NPV \approx 315 + PV$ (эксплуатационные расходы 5,75/год, 50 лет) $\approx$ $\approx 315 + 5{,}75 \cdot (1 - 1{,}07^{-50}) / 0{,}07 \approx 315 + 5{,}75 \cdot 13{,}8 \approx 315 + 79{,}4 = 394{,}4$ бел. руб./м²;

– B1 (керамика) $NPV \approx 90 + 2{,}0 \cdot 13{,}8 \approx 90 + 27{,}6 = 117{,}6$ бел. руб./м²;

– B2 (металлочерепица) с учётом замены через 25 лет (капитальные затраты 56 бел. руб./м² в году 25, дисконтированные к году 0: $56 \cdot 1{,}07^{-25} \approx 56 \cdot 0{,}184 = 10{,}3$ бел. руб./м²): $NPV \approx 56 + 10{,}3 +$ $+ 1{,}5 \cdot 13{,}8 \approx 56 + 10{,}3 + 20{,}7 = 87{,}0$ бел. руб./м²;

– для B3 (битумная) с заменой через 17 лет (дисконтировано $43 \cdot 1{,}07^{-17} \approx 43 \cdot 0{,}317 =$ $= 13{,}6$ бел. руб./м²): $NPV \approx 43 + 13{,}6 + 1{,}5 \cdot 13{,}8 \approx 43 + 13{,}6 + 20{,}7 = 77{,}3$ бел. руб./м².

Таким образом, по показателю совокупной стоимости за 50 лет стеклянная черепица остаётся наиболее дорогим вариантом (394 бел. руб./м² против 77–118 бел. руб./м² у конкурентов). Однако при добавлении стоимости естественного освещения и архитектурной уникальности, а также возможности интеграции фотоэлектрических модулей, ситуация поменяется.

Подводя итог, стеклянная черепица не может быть отнесена к экономически оправданным решениям для массового строительства. Подобные решения не ориентированы на прямую экономию. Их применение связано преимущественно с получением дополнительных эффектов, не всегда отражаемых в финансовых показателях. Существенные капитальные затраты и длительный срок возврата инвестиций ограничивают применение стеклянной черепицы в бюджетных проектах. Вместе с тем использование стеклянных кровельных систем оправдано в проектах, где важны архитектурная выразительность, комфорт внутренней среды и инвестиционная привлекательность (коммерческая недвижимость, жильё повышенного класса, а также общественные и туристические комплексы).

Список литературы

1 **Götze, U.** Investment Appraisal: Methods and Models / U. Götze, D. Northcott, P. Schuster. – Berlin : Springer, 2015. – 366 p.

2 ОАО «Гродненский стеклозавод». Технический каталог продукции. – Гродно, 2022. – 48 с.

3 **Лаппо, А. И.** Технология механической обработки листового стекла на предприятиях Республики Беларусь / А. И. Лаппо, В. П. Кузьмич // Стекло и керамика. – 2021. – № 5. – С. 12–18.

4 Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Цены на строительные материалы и работы: бюллетень, II кв. 2025 г. – Минск, 2025. – 42 с.

5 СтройМаркет. Каталог кровельных материалов с ценами. – Минск, 2025. – URL: https://stroyarket.by (дата обращения: 10.08.2026).

6 **Василевич, Д. С.** Коррозионная стойкость крепежа в узлах светопрозрачных кровель / Д. С. Василевич // Вестник БНТУ. – 2020. – № 4. – С. 78–83.

7 Национальный банк Республики Беларусь. Ставка рефинансирования и инфляция: аналитический обзор. – Минск, 2025. – 18 с.

УДК 691-419.3

СТЕКЛЯННАЯ ЧЕРЕПИЦА: ИСТОРИЧЕСКИЕ ПРОТОТИПЫ И ГЕНЕЗИС ИДЕИ ПРОЗРАЧНОЙ КРОВЛИ. НОРМАТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

И. А. КОВГАР
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Традиционные кровельные покрытия – керамическая и цементно-песчаная черепица, металлочерепица, битумный гонт – обеспечивают надёжную гидроизоляцию и ремонтопригодность, однако принципиально исключают возможность естественного освещения подкровельного пространства. Существующие приёмы интеграции света посредством устройства мансардных окон, зенитных фонарей требуют усиления стропильной системы, создавая мостики холода и визуальную дробность. Стеклянная черепица как штучный модуль из закалённого или многослойного стекла способна соединить морфологию классической черепичной кровли со светопропусканием. Более того, в зависимости от нанесённых покрытий, такая черепица может иметь регулируемое теплопоступление и фотогальваническую функцию.

С подлинным рождением стеклянной черепицы как промышленного продукта связывают расцвет оранжерейного строительства в Викторианскую эпоху. В знаменитом Хрустальном дворце Дж. Пакстона (1851 г.) применялась система стандартных листов стекла, закреплённых в чугунных шпросах, однако уже тогда патент Пакстона на Ridge-and-Furrow включал идею каналов для отвода конденсата и дождевой воды, что роднит его с конструкцией черепичного стыка. Исследователи Г. Кольмайер и Б. фон Сартори подробно проанализировали, как переход от крупноразмерного литого стекла к мелким фигурным элементам был продиктован криволинейными поверхностями зимних садов. Когда требовалось перекрыть купол малого радиуса, стекольщики нарезали ромбовидные пластинки и укладывали их как рыбью чешую на свинцовую или медную фальцевую ленту. Такой приём, описанный также Дж. МакКином [1], стал прямым предшественником чешуйчатой стеклянной кровли. Важнейшим технологическим достижением того периода стало осознание необходимости капиллярного паза на нижней кромке каждой «чешуйки»: если вода затягивалась в горизонтальный шов, отсутствие каплереза приводило к затеканию влаги на внутреннюю сторону. Пакстон решил эту проблему путём устройства внутреннего желоба в чугунных рёбрах; позже в штучной стеклянной черепице роль каплереза стала выполнять специальная фаска.

Параллельно с листовым стеклом в конце XIX века получили развитие полые стеклянные блоки, изобретённые швейцарцем Фальконье. Хотя их основное применение – вертикальные стены и своды, принцип модульного стеклянного элемента, заполненного воздухом и работающего как теплоизолятор, оказал большое влияние на конструирование стеклянной черепицы XX века. В статье М. Гвардильи [2] реконструирована технология выдувания блоков Фальконье и показано, что именно их торцевые профили с выемками и гребнями стали прообразом замковых соединений современных стеклянных кровельных плиток. Интересно то, что блоки Фальконье иногда укладывали плашмя на сводах, имитируя черепицу, хотя герметизация сопряжений оставалась слабым местом.

В первой трети XX века интерес к стеклянной черепице подпитывался эстетикой модернизма и идеей «парящей крыши». Фрэнк Ллойд Райт в эссе «Будущее архитектуры» [3] писал о стекле как о «лёгких здания» и мечтал о прозрачных скатах, под которыми человек оставался бы визуально связан с небом, но защищён от стихии. Однако реальных проектов стеклянной черепицы Райт не осуществил: основной преградой являлось отсутствие эластичных герметиков, способных выдерживать температурное расширение стекла. В 1930-е годы предпринимались попытки создания стеклянных гонтов, залитых в латунную рамку (запатентованная система «Vitrolux»), но высокая стоимость и склонность латуни к коррозии в кислой среде быстро свернули эти эксперименты. Обзор неудавшихся проектов того времени дан М. Виггинтоном в монографии «Glass in Architecture» [4], где подчёркнуто, что лишь с появлением силиконовых и полиуретановых клеёв в 1960‑х годах идея стеклянной черепицы обрела реальную материальную базу.

Таким образом за рубежом, в первую очередь в Германии и скандинавских странах, стеклянная черепица прошла путь от экспериментальных оранжерейных элементов XIX века до сертифицированных систем (SolTech Sigma, Tesla Solar Roof, Glasbau Hahn), обеспеченных детальными технологическими регламентами и инженерными методиками расчёта. В то же время в белорусской строительной науке и практике конструктивно-технологические аспекты устройства таких кровель остаются практически не исследованными.

В странах постсоветского пространства, включая Республику Беларусь, стеклянная черепица до настоящего времени не получила заметного распространения. В диссертации А. А. Пинчука [5], посвящённой эксплуатационной надёжности кровель в условиях Беларуси, стеклянные покрытия даже не упоминаются, что свидетельствует об их крайней редкости. Единичные реализованные проекты (как правило зимние сады и бассейны в элитных коттеджах) выполняются по импортным технологическим картам (преимущественно польским и литовским) с использованием алюминиевых профильных систем Aliplast, Reynaers, Schuco. В этих системах стеклопакет зажимается в фальцевом профиле, а внешняя поверхность маскируется декоративными накладками, имитирующими черепицу. Однако, как справедливо отмечает А. М. Блинов [6], такие конструкции юридически проходят по разделу «светопрозрачные фасады» и не учитывают специфические нагрузки скатной кровли: лежащий снег, сползание ледяных пластов, динамические удары при очистке.

Нормативная база Республики Беларусь в области стеклянных кровель отсутствует. Основные документы – СН 2.01.01-2019 «Нагрузки и воздействия», ТКП 45-3.02-230-2010 «Кровли. Строительные нормы проектирования» – рассматривают кровельные покрытия либо как штучные непрозрачные (черепица, шифер), либо как листовые (металлочерепица, профилированный лист). Стекло как материал кровли упоминается лишь в контексте зенитных фонарей и стеклопакетов, но не штучной черепицы. СТБ EN 14437-2013 «Определение сопротивления подъёму ветром» мог бы служить подспорьем, однако представленная в нормативном документе методика испытаний предполагает наличие гибкого основания (обрешётки), тогда как стеклянная черепица часто требует сплошного настила. Таким образом, без разработки специальных технических условий (СТУ) или стандарта предприятия не представляется возможным легитимное применение стеклянной черепицы в Республике Беларусь.

В российской науке также предпринимались шаги по заполнению нормативного пробела. В диссертации П. В. Стратана [7] дана методика расчёта светопрозрачных кровель на основе DIN 18008, но без адаптации к отечественным нагрузкам. Исследователи из МГСУ [8] предлагают классифицировать стеклянную черепицу как «стеклянные кровельные модули», однако их классификация не привязана к климатическим зонам Беларуси. Интересны результаты обследования эксплуатируемых стеклянных кровель в Санкт-Петербурге, где снеговая нагрузка сопоставима с минской: авторы за-

фиксировали многочисленные сколы кромок и трещины в зонах точечного закрепления, причиной которых стало отсутствие подвижных шарниров и недоучёт температурного коробления обрешётки.

Видится, что отечественная стекольная промышленность обладает потенциалом для импортозамещения. ОАО «Гродненский стеклозавод», ОАО «Гомельстекло» имеют мощности. Выпуск стеклянной черепицы связан с фигурным раскроем (ромб, волна, «бобровый хвост») с последующей обработкой кромки и сверлением отверстий под кляммеры, что потребовало бы переналадки оборудования, но самое главное – отсутствует обоснованный спрос.

Выявлен существенный разрыв между уровнем зарубежных разработок и состоянием вопроса в Республике Беларусь. С одной стороны, в Германии, Швеции, США существуют сертифицированные системы стеклянной черепицы с детально проработанными узлами и апробированными методиками расчёта. С другой – отсутствует какая-либо адаптация этих решений к белорусским климатическим нагрузкам, нормативам и производственным возможностям; стекло в кровле рассматривается преимущественно как листовой материал светопрозрачных фасадов и фонарей. Это порождает противоречие между растущим запросом архитекторов и застройщиков на полупрозрачные скатные кровли и отсутствием научно обоснованных конструктивных узлов и технологических карт.

Список литературы

1 **McKean, J.** Crystal Palace: Joseph Paxton and Charles Fox / J. McKean. – London : Phaidon, 1994. – 60 p.

2 **Guardigli, M.** The Falconnier glass blocks: between innovation and conservation / M. Guardigli // Construction History. – 2018. – Vol. 33, No. 1. – P. 85–102.

3 **Райт, Ф. Л.** Будущее архитектуры / Ф. Л. Райт. – М. : Госстройиздат, 1960. – 248 с.

4 **Wiggington, M.** Glass in Architecture / M. Wiggington. – London : Phaidon Press, 1996. – 320 p.

5 **Пинчук, А. А.** Обеспечение эксплуатационной надёжности кровель жилых зданий в условиях Республики Беларусь : дис… канд. техн. наук : 25.03.01 / А. А. Пинчук. – Минск : БНТУ, 2017. – 204 с.

6 **Блинов, А. М.** Применение конструкционного стекла в несущих элементах зданий / А. М. Блинов // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2018. – № 4. – С. 33–39.

7 **Стратан, П. В.** Конструкции светопрозрачных кровель общественных зданий : дис… канд. техн. наук : 05.03.01 / П. В. Стратан. – М. : МГСУ, 2012. – 189 с.

8 Особенности стеклянной черепицы / А. Р. Муртазин, А. А. Авагян, В. С. Миронкин, С. Н. Кротова // Актуальные направления научных исследований: перспективы развития : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 23 апр. 2018 г.) / редкол. : О. Н. Широков [и др.]. – Чебоксары : Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс», 2018. – С. 174–177.

УДК 658.5:69.003

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ НА ВСЕХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОЕКТА, ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ ОБЪЕКТА

О. Н. КОНОВАЛОВА, А. В. НЕСТЕРОВА, А. С. ГОРБУНОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Цифровая трансформация безопасного архитектурно-строительного проектирования под влиянием технологий информационного моделирования (BIM) строительной отрасли Республики Беларусь внедряется не только в проектных институтах, но и непосредственно на строительных площадках. С начала 2000-х годов проектная деятельность сместила вектор работы от кульмана к AutoCAD, а по состоянию на 2020 год проектирование ведется в цифровых программных продуктах с направлением управления цифровой информацией. В современном проектировании зачастую используют технологию информационного моделирования (BIM), которая является полноценным инструментом управления жизненным циклом от проекта до ключа. В целях обеспечения внедрения информационно-коммуникационных и передовых производственных технологий в отрасли национальной экономики и сферы жизнедеятельности общества Совет Министров Республики Беларусь утвердил Государственную программу «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы (далее – Государственная программа). Нормативные документы Республики Беларусь, регламентирующие проектирование с использованием компьютерных технологий, включают Указ Президента № 381 «О цифровом развитии» (2023 г.) как ключевую инициативу, а также Директиву № 8, в которой определены масштабные цифровые трансформации строительного комплекса и приоритетное

использование технологий информационного моделирования (BIM). Указ № 381 «О цифровом развитии» (2023 г.) определяет основные подходы к цифровизации страны до 2030 года и направлен на реализацию мероприятий и пилотных проектов в сфере цифрового развития, включая создание и использование цифровых платформ, что напрямую затрагивает сферу проектирования.

Приоритетным направлением для внедрения цифровизации до 2030 года является создание цифровых платформ и интеграции с искусственным интелектом. [1] Государственный строительный портал формирует единую информационную среду для удобного пользования данными по проекту всеми участниками проектирования, строительного производства, заказчиками, застройщиками, инвесторами и иными участниками инвестиционного процесса путем перевода административных процедур в электронный вид.

Анализируя переход от традиционного двухмерного черчения к созданию параметрических цифровых двойников, можно проследить следующие проблемы: необученность сотрудников (дефицит опытных специалистов, умеющих работать с базами данных и устранять ошибки), проблемы с форматами данных (при передаче файлов между разными программами зачастую теряются свойства элементов или ломается геометрия), перегрузка модели ненужной на строительном объекте информацией (это тормозит работу софта). Особое внимание уделяется практическим аспектам применения BIM в Республики Беларусь, вопросам надежности, коллизионной проверке и интеграции со смежными цифровыми технологиями (IoT, дополненная реальность).

Работа в BIM-среде продиктована текущей конъюнктурой, характеризующейся высоким спросом доступности ко всем разделам проектирования, позволяющим при изменении одного параметра иметь картину данных с учетом этих изменений, глобализацией логистических цепочек и стремительным технологическим развитием. В таких условиях оптимальная организация материально-технического обеспечения (МТО) выступает ключевым фактором сохранения конкурентоспособности строительного предприятия. Так как традиционные подходы к календарному планированию закупок, выполнению производственных процессов, сбыта зачастую не способны обеспечить необходимую оперативность и слаженность перемещения ресурсов, на помощь приходит цифровизация в BIM-среде [4].

Календарное планирование на современном этапе представлено как через диаграмму Ганта, (предложенную Г. Л. Гантом в начале прошлого века, которая продолжает оставаться востребованным средством визуализации графиков работ), так и с использованием универсальных платформ или специализированного пакета MS Project. Классическая версия акцентирует внимание исключительно на временных рамках, упуская из виду объемы и динамику потоков. Современная парадигма логистики смещает фокус с контроля изолированных операций на управление сквозными интегрированными процессами [1, 2]. Разработка алгоритма построения, который позволит перейти от простого календарного планирования к полноценному управлению потоками, ресурсами.

Ключевое отличие информационной модели от обычной трехмерной графики – в насыщенности данными. Как справедливо отмечают эксперты, BIM-модель содержит не только геометрию, но и полную атрибутивную информацию: от марки бетона до производителя светильников и графика поставок [2].

«BIM – это "цифровой двойник" будущего здания, где архитекторы, инженеры и подрядчики действуют как одна команда внутри единой цифровой среды» [5]. Организация этой совместной работы происходит в Среде общих данных (СОД). Это фундамент цифровизации, позволяющий избежать разночтений и потери версий документации. Например, в масштабных проектах количество пользователей в СОД достигает нескольких тысяч, а объем хранимой информации исчисляется терабайтами [2]. Главный экономический эффект BIM достигается за счет выявления и устранения ошибок на ранних стадиях, когда стоимость их исправления минимальна. При двумерном проектировании сложные узлы сопряжений конструкций, сетей и иных систем часто маркировались пометкой «определить по месту», что переносило проблемы и финансовые риски на стройплощадку [5].

BIM-моделирование позволяет проводить коллизионную проверку (Clash Detection) автоматически. Исследования подтверждают, что применение BIM сокращает общие сроки строительства практически вдвое за счет исключения простоев и переделок [5].

Информационная модель работает на всех этапах жизни объекта.

1 Проектирование: параметрическое моделирование позволяет автоматически обновлять чертежи при изменении планировки. Например, перенос перегородки влечет за собой автоматический пересчет площадей, объема материалов и спецификаций [5].

2 Строительный контроль: современные методы включают интеграцию BIM с технологиями дополненной реальности. Специалисты технадзора могут наложить виртуальную модель на реальный строящийся объект через планшет, сверяя соответствие с точностью до сантиметра [4].

3 Эксплуатация: после ввода здания в эксплуатацию модель передается в коммунальное жилищное ремонтно-эксплуатационное предприятие и всем подведомственным учреждениям, которые заняты эксплуатацией этого объекта. Она становится основой для цифрового двойника, связанного с IoT-датчиками. Это позволяет отслеживать износ и планировать ремонт.

4 Экологический аспект: BIM позволяет проводить энергетический анализ и оценку агрессивности еще на стадии выбора строительных материалов, что способствует «зеленому» строительству.

Внедрение BIM имеет ряд ограничений. Это и необходимость перестройки внутренних бизнес-процессов компании, традиции культуры проектирования и возведения, лицензия на использование продукта и его цена.

Перспективным направлением является интеграция технологий BIM и CIM (City Information Modeling), что позволяет перейти от моделирования отдельных зданий к созданию цифровых двойников целых районов и городов, управляя инфраструктурой комплексно.

Современное проектирование невозможно представить без технологий информационного моделирования (BIM), которые перестали быть просто «объемной картинкой», превратившись в полноценный инструмент управления жизненным циклом от проекта до объекта [2, 5]. Доля застройщиков, работающих с технологиями информационного моделирования (ТИМ), неуклонно растет. Это связано как с требованиями законодательства (постановление Правительства № 331), так и с прямым экономическим эффектом, который дает BIM.

В Республике Беларусь также активно формируется нормативная база: согласно постановлению Совета Министров № 266 от 15 мая 2025 года, продолжается совершенствование архитектурной и строительной деятельности в части внедрения цифровых технологий. Ключевым документом стало постановление Минстройархитектуры № 73 от 26 июня 2025 года, вступившее в силу в октябре 2025 года, которое устанавливает специальные технические требования к применению технологий информационного моделирования. Кроме того, постановление Совета Министров № 561 от 10 октября 2025 года внесло изменения в действующие акты, уточняя механизмы параллельной разработки проектной документации и строительства с учетом цифровых процессов. Благодаря этим мерам цифровизацией охвачена часть строительного рынка Республики Беларусь, с выходом на полный охват к 2030 году.

Список литературы

1 О совершенствовании архитектурной и строительной деятельности в части внедрения цифровых технологий : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 15 мая 2025 г. № 266 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. 2025. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500266 (дата обращения: 02.09.2026).

2 Об установлении специальных технических требований к применению технологий информационного моделирования : постановление М-ва архит. и стр-ва Респ. Беларусь от 26 июня 2025 г. № 73 (вступило в силу 7 окт. 2025 г.) // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. 2025. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500073 (дата обращения: 02.09.2026).

3 О внесении изменений в некоторые постановления Совета Министров Республики Беларусь по вопросам проектной документации и строительства: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 10 октяб. 2025 г. № 561 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. 2025. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500561 (дата обращения: 02.09.2026).

4 **Алжнде, Г.** Оценка проектирования зданий и сооружений с учетом экологичности материалов с помощью BIM-технологий / Г. Алжнде, Г. Э. Окольникова // Экономика строительства. – 2024. – № 3. – С. 45–52.

5 **Гокканен, А.** От макетов к компьютерам: что такое BIM / А. Гокканен, К. Логинов, Л. Лоренц // Компьютерра. 2025. – URL: https://www.computerra.ru/bim-guide (дата обращения: 02.09.2026).

УДК 666.97.035

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ БЕТОНОВ НА ОБЪЕКТАХ ТРАНСПОРТА

В. А. КОНЫШКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Развитие транспортной инфраструктуры Республики Беларусь неразрывно связано с повышением требований к долговечности и эксплуатационной надёжности бетонных и железобетонных конструкций. Одним из наиболее перспективных направлений решения данной задачи является наномодификация цементных систем – введение в состав бетонных смесей добавок, содержащих компоненты с наноразмерными характеристиками. Настоящая работа посвящена анализу практики применения нанодобавок в транспортном строительстве Беларуси, систематизации накопленного опыта и выявлению ключевых проблем, сдерживающих широкое внедрение данной технологии.

Ведущим научным центром в области применения нанодобавок в строительных материалах в Республике Беларусь является Белорусский национальный технический университет (БНТУ). Кафедра строительных материалов и технологии строительства архитектурно-строительного факультета ведёт систематические исследования в данной области начиная с конца 2000-х годов. Тематика работ охватывает разработку составов высокопрочных бетонов для транспортных конструкций с применением наносилики, комплексных добавок на основе суперпластификаторов нового поколения и наноразмерных компонентов, а также изучение механизмов влияния нанодобавок на кинетику гидратации и формирование микроструктуры цементного камня [1].

Исследовательские работы БНТУ [2–4] направлены прежде всего на решение наиболее острой практической проблемы белорусского дорожного строительства – обеспечение высокой морозостойкости цементобетонных покрытий. Полученные в лабораторных условиях результаты свидетельствуют о возможности повышения марки по морозостойкости дорожного бетона с F250–F300 до F400–F500 при введении nano-SiO_2 в оптимальном количестве 3–5 % от массы цемента в сочетании с воздухововлекающей добавкой и суперпластификатором поликарбоксилатного типа. Сотрудники кафедры участвуют в совместных проектах с российскими партнёрами, в частности с МГСУ и НИИЖБ им. А. А. Гвоздева, в рамках научно-технического сотрудничества Союзного государства.

Белорусский научно-исследовательский институт строительства (БелНИИС) выполняет функцию прикладного звена между университетской наукой и строительным производством. В части нанодобавок для транспортного строительства деятельность института направлена на оценку применимости разработанных составов в условиях реального производства, разработку технических условий на наномодифицированные бетоны и методических рекомендаций по технологии их приготовления и укладки [5]. Отраслевые организации дорожного строительства – РУП «Белдорцентр», ДП «Белорусавтодор» – эксплуатируют аккредитованные испытательные лаборатории, обеспечивая цепочку «исследование – испытание – апробация». Физико-технический институт НАН Беларуси осуществляет аналитическое сопровождение исследований: характеризацию наночастиц методами электронной микроскопии, рентгенофазовый анализ, динамическое рассеяние света [6].

Наносилика является доминирующей нанодобавкой в белорусской практике транспортного строительства. Это обусловлено совокупностью факторов: относительно умеренной стоимостью, наличием проверенных технологий применения, хорошо изученными механизмами действия и наиболее благоприятным соотношением «эффект/риск» с точки зрения безопасности.

В Беларуси наносилика для строительных целей поступает преимущественно по двум каналам. Импорт из Российской Федерации представлен пирогенной наносиликой торговых марок «Росил», «Аэросил». Импорт из европейских стран осуществляется в меньших объёмах через белорусские дистрибьюторские компании. Параллельно в НАН Беларуси и БГТУ ведутся исследования по получению наносилики из отечественного сырья. Перспективными источниками являются зола-унос Лукомльской и Берёзовской ГРЭС, диатомитовые отложения белорусских месторождений, содержащие биогенный нанокремнезём с размером частиц 50–200 нм [7].

Применительно к транспортному строительству исследования БНТУ охватывают оптимизацию дозировки (установленный оптимум – 3–5 % от массы цемента для дорожных бетонов, 4–6 % для аэродромных), выбор метода введения (в виде водной суспензии с концентрацией 20–30 %, диспергированной ультразвуком или с применением ПАВ-диспергаторов), подбор совместимых суперпластификаторов поликарбоксилатного типа [2, 4].

Практически важным направлением является применение комплексных химических добавок, содержащих наноразмерные компоненты. Ряд ведущих производителей строительной химии – BASF, Sika, Mapei – выпускает суперпластификаторы и уплотняющие добавки, содержащие наноразмерный кремнезём в качестве одного из компонентов. Их практическое применение в белорусском транспортном строительстве носит значительно более широкий характер, чем применение «чистых» нанодобавок [5].

Направление применения базальтовых нановолокон разрабатывается в Беларуси с учётом наличия собственной базы сырья (Микашевичское месторождение). Исследования в БГТУ показали, что введение базальтовых волокон тонкого помола (диаметр 0,5–2 мкм) в количестве 0,5–1,5 % от массы бетона повышает трещиностойкость дорожного бетона и снижает усадочное растрескивание [8].

Дорожные цементобетонные покрытия представляют наиболее значимое с практической точки зрения направление применения нанодобавок в Беларуси. В рамках исследовательских программ БНТУ совместно с производственными организациями дорожного строительства в Минской и Гродненской областях в период 2012–2020 годов были реализованы опытные участки дорожных покрытий с применением наносилики. Опытные участки на дорогах М1 (Брест – Минск – граница России) и М4 (Минск – Могилёв) длиной 100–500 м были уложены из наномодифицированного бетонного состава: цемент ПЦ500Д0 Кричевского цементного завода, расход 380–400 кг/м³, nano-SiO_2 4 % от массы цемента, суперпластификатор поликарбоксилатный 0,8–1,0 %, воздухововлекающая добавка (вовлечённый воздух 4,5–5,5 %), В/Ц = 0,36…0,38 [3].

По результатам лабораторных испытаний контрольных образцов характеристики наномодифицированного бетона составили: прочность на сжатие С28/35–С32/40 (проектная С25/30), прочность на растяжение при изгибе 5,2–5,8 МПа (норматив ≥ 4,5 МПа), морозостойкость F400 (норматив F300), водонепроницаемость W8 (норматив W6), истираемость 0,55 г/см² (норматив ≤ 0,70 г/см²). Таким образом, по всем нормируемым показателям наномодифицированный бетон превысил требования строительных норм для дорог I–II категорий с резервом 20–50 %. Инструментальный мониторинг опытных участков в течение 3–5 лет показал отсутствие характерных для обычного дорожного бетона видов разрушения – шелушения поверхности, отслоения верхнего слоя под воздействием противогололёдных материалов, усадочного растрескивания [3].

Применение нанодобавок в мостостроении Беларуси носит более фрагментарный характер. Ряд объектов в 2015–2023 годах был реализован с применением высококачественных бетонов, включающих микрокремнезём (субмикронный аналог наносилики) и суперпластификаторы с наноразмерными компонентами. В частности, при строительстве мостового перехода через реку Припять в районе г. Мозыря пролётные строения были выполнены из бетона класса С40/50 с расходом цемента 420 кг/м³, микрокремнезёмом (10 % от массы цемента) и суперпластификатором поликарбоксилатного типа [10]. Отдельным направлением является разработка составов для мостовых конструкций с повышенной стойкостью к хлоридной коррозии: БелНИИС совместно с БНТУ разработаны составы бетонов классов С40/50–С50/60 с дополнительным введением nano-SiO_2 (3–5 %), обеспечивающих коэффициент диффузии хлоридов не более $2 \cdot 10^{-12}$ м²/с [5].

Особые условия характерны для Минского метрополитена. Тоннельные обделки функционируют в условиях постоянного воздействия грунтовых вод, высокого гидростатического давления, воздействия блуждающих токов от контактной сети. При строительстве новых участков третьей линии в 2010–2020-е годы применялись бетоны для обделок с повышенными требованиями к водонепроницаемости (W10–W12) и химической стойкости. В ряде случаев включались кристаллизующиеся добавки типа «Пенетрон» и «Кристаллизол», содержащие активные компоненты с наноразмерными характеристиками (кристаллы цеолитов размером 10–100 нм) [10].

Наиболее жёсткие требования предъявляются к аэродромным покрытиям: высокие классы прочности (С32/40–С45/55), морозостойкости (F400–F600), истираемости (не более 0,4 г/см²). Ис-

следования по применению нанодобавок в аэродромных бетонах в Беларуси ведутся в рамках взаимодействия БНТУ с Вооружёнными Силами Республики Беларусь. Разработанные составы с добавкой nano-SiO_2 4–6 % обеспечивают в лабораторных условиях прочность на сжатие C40/50–C45/55, морозостойкость F500, истираемость 0,35–0,42 г/см² [11].

Приготовление наномодифицированных бетонных смесей на белорусских бетонных заводах сопряжено с рядом технологических особенностей. Белорусские заводы товарного бетона оснащены смесителями принудительного перемешивания, пригодными для приготовления наномодифицированных смесей, однако не располагают специализированным оборудованием для приготовления и дозирования наносуспензий.

Наиболее технологически приемлемым в белорусских условиях признан следующий способ введения наносилики: приготовление водной суспензии nano-SiO_2 с концентрацией 20–25 % масс., диспергированной путём добавления 0,3–0,5 % ПАВ-диспергатора и интенсивного перемешивания в течение 15–20 минут; подача суспензии через дозатор жидких добавок бетоносмесительного узла вместо части воды затворения; сокращение свободной воды затворения на объём, содержащийся в суспензии. Данная технология не требует установки специализированного ультразвукового оборудования и реализуема на стандартном производственном оборудовании.

Проведённый анализ практики применения нанодобавок в транспортном строительстве Республики Беларусь позволяет сформулировать следующие выводы. Во-первых, данное направление находится на стадии перехода от лабораторных исследований к опытно-промышленному внедрению: реализованы опытные участки дорожных покрытий на магистральных трассах, подтвердившие эффективность наномодификации для повышения морозостойкости и эксплуатационной долговечности. Во-вторых, доминирующей нанодобавкой является наносилика, что обусловлено благоприятным соотношением «эффект/риск» и наличием проверенных технологий применения. В-третьих, сохраняется зависимость от импортных поставок наносилики, что делает стратегически важной задачу разработки отечественного производства из местного сырья. Решение перечисленных задач при системной государственной поддержке способно в горизонте 10–15 лет обеспечить переход к массовому применению нанодобавок в транспортном строительстве Беларуси.

Список литературы

1 **Каширипур, М. М.** Нанотехнология и строительство / М. М. Каширипур, В. А. Казакевич // Строительство и строительные технологии: наука и практика : материалы междунар. науч.-техн. конф., посвященной 105-летию строительного факультета БНТУ, 22–23 мая 2025 г. / сост. : В. Ю. Минич, С. Н. Ковшар. – Минск : БНТУ, 2026. – С. 14–17.

2 **Полонина, Е. Н.** Конструкционный бетон, модифицированный комплексной добавкой, содержащей гидротермальный нанокремнезем и углеродные нанотрубки : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.23.05 / Е. Н. Полонина ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2022. – 24 с.

3 **Шейда, О. Ю.** Влияние комплексной химической добавки, содержащей структурированный углеродный наноматериал, на свойства цемента / О. Ю. Шейда, Э. И. Батяновский // Наука и техника. – 2015. – № 2. – С. 1–8.

4 Физические свойства нанобетона / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, С. А. Жданок [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 96, № 4. – С. 1028–1036.

5 Белорусский научно-исследовательский институт строительства (БелНИИС) : [сайт]. – Минск, 2003–2026. – URL: https://belniis.by (дата обращения: 05.09.2026).

6 Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси : [сайт]. – Минск, 2026. – URL: https://fti.by (дата обращения: 05.09.2026).

7 Разработка технологии получения нанокремнезёма из отходов теплоэнергетики : отчёт о НИР / Ин-т общей и неорганической химии НАН Беларуси ; рук. А. И. Ратько. – Минск, 2023. – 128 с. – № ГР 20211734.

8 Базальтовые нановолокна для строительных композитов : материалы науч.-техн. семинара / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск : БГТУ, 2024. – 56 с.

9 Строительство мостового перехода через реку Припять в районе г. Мозыря : информационный бюллетень / ДП «Белорусавтодор». – Минск, 2025. – 12 с.

10 **Леонович, С. Н.** Применение кристаллизующихся добавок в бетонах подземных сооружений : метод. рекомендации / С. Н. Леонович. – Минск : Белорус. науч.-исслед. ин-т стр-ва, 2023. – 44 с.

11 Исследование свойств аэродромных бетонов с нанодобавками : отчёт о НИР / Белорус. нац. техн. ун-т ; рук. В. В. Потапов. – Минск, 2024. – 96 с. – № ГР 20221056.

УДК 666.9.035:691.32

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ БЕТОНОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

В. А. КОНЫШКО, Т. В. ЯШИНА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Бетон остаётся основным конструкционным материалом в транспортном строительстве, однако его классические составы не всегда способны обеспечить требуемую долговечность при интенсивных динамических нагрузках, перепадах температур и агрессивном воздействии сред (химические реагенты, хлориды, карбонизация). В последние десятилетия довольно активно развивается направление наномодификации цементных систем, которое позволяет целенаправленно изменять структуру материала на микро- и наноуровне. Ключевая особенность наноразмерного диапазона – это возникновение у наноструктурированных объектов принципиально новых свойств, отсутствующих как у отдельных атомов, так и у макроскопических аналогов. Это открывает возможности для создания бетонов с улучшенными характеристиками (повышенной прочностью, морозостойкостью, водонепроницаемостью, трещиностойкостью, фотокаталитической активностью).

Для Республики Беларусь, характеризующейся умеренно-континентальным климатом с частыми циклами замораживания-оттаивания, проблема повышения долговечности транспортных сооружений (автомобильных дорог, мостов, путепроводов) стоит особенно остро. Применение нанодобавок позволяет не только улучшить эксплуатационные показатели бетона, но и снизить ремонтные затраты за счёт увеличения межремонтных сроков. Кроме того, использование местного сырья для синтеза наномодификаторов (например, на основе отходов теплоэлектростанций) способствует снижению импортозависимости и углеродного следа строительной отрасли. В связи с этим систематизация и обобщение имеющихся экспериментальных данных по эффективности различных типов нанодобавок представляет собой важную научно-практическую задачу.

В исследовании механической микроструктурной оценки бетона с диоксидом нанотитана [1] изучалось действие нано-TiO_2 (NT) в дозировках 0,5; 1,0 и 1,5 % от массы цемента на бетон класса М40. Установлено, что максимальный прирост прочности на сжатие (на 28,7 %), прочности на растяжение при расколе (на 30,3 %) и прочности на изгиб (на 40,7 %) достигается при введении 1,5 % NT. При этом 180-суточная прочность на сжатие составила 75,25 МПа, что подтверждает длительный положительный эффект наномодификации. Авторы связывают это с ускорением гидратации клинкерных минералов, образованием дополнительного C‑S‑H-геля и уплотнением микроструктуры.

В работе группы исследователей [2] изучено влияние графеновых нанопластинок (GNP) в концентрации 0,25 % с предварительной ультразвуковой диспергацией. Показано, что при таком введении прочность на сжатие возрастает на 20,8 %, на растяжение – на 11,4 %, на изгиб – на 10,5 % по сравнению с контрольным составом. При этом использование только механического перемешивания (без соникации) давало меньший эффект (13,2 % прироста сжатия). Авторы объясняют это лучшей дезагломерацией и равномерным распределением наночастиц в матрице при ультразвуковой обработке.

Молекулярно-модифицированные поликарбоксилатные суперпластификаторы (PCE) также показали значительный потенциал. В исследовании [3] синтезированный сополимер PCE‑2 (на основе полиэтиленгликольмалеата, изопренилоксиполиэтиленгликоля и акриловой кислоты) при дозировке 0,3 % обеспечил снижение водопотребности на 40 % и увеличение прочности на сжатие на 105,6 % через 28 суток по сравнению с контрольным образцом. Это объясняется усилением электростатических и стерических сил отталкивания между частицами цемента за счёт большего числа карбоксильных групп и боковых цепей, что улучшает диспергирование и способствует более полной гидратации.

В совместной работе китайских и других ученых по исследованию наномодифицированных цементных смесей [4] изучено влияние углеродных нанотрубок (CNT) в сочетании с полимерной добавкой Ethacryl HF. Установлено, что при содержании CNT 0,1 % от массы цемента прочность на сжатие увеличивается на 19 % в 28-суточном возрасте, а при 0,5 % – на 23 %. Одновременно ускоряются сроки схватывания на 10–25 минут, что важно для монолитного строительства.

Повышение долговечности является одним из главных преимуществ наномодификации. В научном исследовании китайской группы ученых [5] изучалось действие нано-TiO_2 на стойкость

бетона к хлоридной проницаемости, кислотной коррозии и замораживанию-оттаиванию. Образцы с 1,5 % NT после 90 дней выдерживания в 4%-ных растворах HCl и H_2SO_4 сохраняли более высокую остаточную прочность (соответственно 51,4 и 59,6 МПа), чем контрольный образец (39,9 и 41,7 МПа). Скорость карбонизации в NT-содержащих образцах была практически нулевой, тогда как контрольный показал глубину 1,4 мм.

В работе по изучению влияния графеновых нанопластинок также подтверждено, что GNP снижают водопоглощение на 28,3 %, объём открытых пор – на 26,3 %, а начальную и вторичную сорбцию – на 22 и 27 % соответственно. Это достигается благодаря наполнению нанопор и уплотнению структуры, что уменьшает пути проникновения воды и агрессивных ионов.

Исследования [5] показали, что введение карбида кремния (SiC) также улучшает высокотемпературную стойкость: при нагреве до 600 °C образцы с SiC сохраняли прочность на 30–40 % выше, чем обычный бетон. Механизм связывают с тем, что частицы SiC служат барьерами для распространения микротрещин и снижают термическую деградацию C‑S‑H.

Микроструктурный анализ (СЭМ, петрография, РФА) позволяет объяснить наблюдаемое улучшение свойств. В работах китайских и индийских ученых показано, что наночастицы TiO_2 действуют как центры кристаллизации, способствуя формированию дополнительных гидросиликатов кальция (C‑S‑H) и связыванию портландита (CH). При этом снижается отношение Ca/Si (с 3,14 до 0,91), что указывает на рост доли высокоосновных гидросиликатов и уплотнение структуры. В присутствии нано-TiO_2 наблюдается также уменьшение размера и количества капиллярных пор.

В случае графеновых нанопластинок их высокая удельная поверхность и 2D-форма способствуют адсорбции на них продуктов гидратации, что приводит к формированию «мостиков» между частицами и повышению трещиностойкости. Аналогичный эффект описан для углеродных нанотрубок [4], которые образуют пространственную сетку, армирующую матрицу на наноуровне.

В исследовании бетона с диоксидом нанотитана выполнен анализ выгод и затрат (BCR) для бетона с NT. Показано, что при дозировке 1 % NT BCR составляет 0,063 (наибольшее значение), что указывает на приемлемое соотношение прироста свойств к дополнительным затратам. При этом расчёт жизненного цикла для морского сооружения показал, что применение NT позволяет отложить капитальный ремонт на 10 лет, обеспечивая чистую экономию около 1,41 млн рублей (в эквиваленте) за счёт снижения частоты ремонтов. Таким образом, наномодификация экономически оправдана, особенно для ответственных транспортных объектов с высокими требованиями к долговечности.

Проведённый обзор экспериментальных данных показывает, что применение нанодобавок в бетонах является эффективным инструментом управления свойствами материала. Оптимальные дозировки для большинства нанодобавок (нано-TiO_2, GNP, CNT) лежат в диапазоне 0,05–1,5 % от массы цемента. Превышение этих значений ведёт к агломерации и снижению эффективности. Введение наночастиц позволяет повысить прочность на сжатие на 20–105 %, прочность на растяжение – на 11–30 %, прочность на изгиб – на 10–40 % в зависимости от типа и способа диспергирования. Наномодификация существенно улучшает долговечность: снижаются водопоглощение, хлоридная проницаемость, возрастает морозостойкость (потеря массы снижается до 0,8 % после 120 циклов), замедляется карбонизация. Микроструктурные исследования подтверждают уплотнение цементного камня, образование дополнительных фаз C-S-H, уменьшение пористости и микроармирующий эффект. Экономический анализ свидетельствует о целесообразности применения нанодобавок в транспортном строительстве благодаря продлению межремонтных сроков и снижению эксплуатационных затрат.

Список литературы

1 Mechanical, microstructure, durability, and economic assessment of nano titanium dioxide integrated concrete / I. Rahman, S. Paruthi, N. Dev [et al.] // Scientific Reports. – URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12603156/ (date of access: 02.09.2026).

2 **Jaramillo, L. J.** Evaluation of mechanical properties and water resistance performance of concrete modified with graphene nanoplatelets (GNP) / L. J. Jaramillo, R. Kalfat // International Journal of Concrete Structures and Materials`. – URL: https://www.researchgate.net/publication/391944538 (date of access: 02.09.2026).

3 **Moeinian, M.** Evaluating the operational properties of concrete admixtures containing molecularly modified polycarboxylate superplasticizers / M. Moeinian, V. Ardjmand, F. Nosratinia // Scientific Reports. – URL: https://www. researchgate.net/publication/383566995 (date of access: 03.09.2026).

4 **Yang, S**. Research of nano-modified plain cement concrete mixtures and cement-based concrete / S. Yang, A. Bieliatynskyi, V. Trachevskyi [et al.]. // International Journal of Concrete Structures and Materials. – URL: https://www.researchgate.net/ publication/373992011 (date of access: 02.09.2026).

5 Study on the high-temperature static and dynamic constitutive model of silicon carbide-modified concrete / J. Wang, Q. Chen, H. Huang [et al.] // Scientific Reports. – URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/41775754/ (date of access: 03.09.2026).

6 **Reddy, N. A.** Impact of nano-TiO_2 on white portland cement mortars: a combined XRD coupled rietveld, crystallographic and microstructural analysis / N. A. Reddy, P. S. Chandana // Discover Materials. – URL: https://www.researchgate.net/ publication/386354251 (date of access: 04.09.2026).

УДК 624.943.012.45

ИЗМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ПОПЕРЕЧНОЙ РАМЫ КАРКАСА СБОРНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КОРОВНИКА

О. А. КОРОЛЁВ, В. В. ТАЛЕЦКИЙ
Белорусский *государственный университет транспорта, г. Гомель*

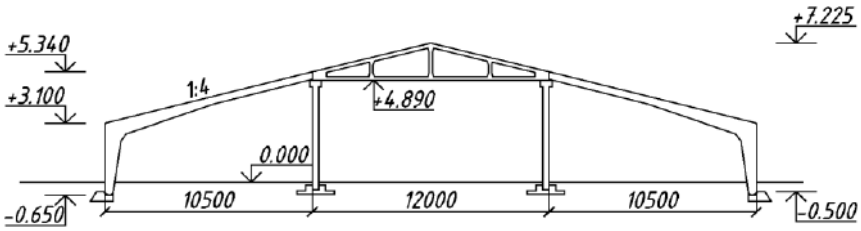
Для строительства коровников в полном железобетонном каркасе первоначально были разработаны балочно-стоечные поперечные рамы. При ширине коровника 18 м рама состояла из колонн и двух пролетов по 9 м, перекрываемых односкатными балками. При ширине коровника 21 м рама состояла из колонн и трёх пролетов, два пролёта по 9 м и один пролет 3 м. Применялись односкатные балки длиной 10,5 м с пролетом 9 м и консолью 1,5 м. Трёхметровый пролёт образовывался за счёт вылета консолей балок. Соединение колонн и стропильных балок во всех схемах поперечных рам шарнирное. Фундаменты под колонны устанавливались сборные железобетонные отдельно стоящие.

При появлении сборных железобетонных Г-образных полурам пролётом 9 и 10,5 м с уклоном ригеля 1/4 ширины коровников сохранились 18 и 21 м, конструктивными схемами стали трёхшарнирные рамы. В коньке полурамы шарнирно соединялись между собой и шарнирно опирались на фундамент. Фундамент – монолитный железобетонный в виде блока, воспринимающего возникающий в раме распор. Разработан был так же свайный фундамент.

В связи с увеличением производства молочных продуктов требовалось наращивание дойного стада и соответственно увеличение размеров коровников. Были разработаны коровники шириной 33 м. В одном варианте поперечная рама балочно-стоечная, состоящая из трех пролётов. Два крайних пролёта перекрывались 9-метровыми односкатными балками, а средний пролёт 12-метровой треугольной железобетонной или стальной фермой. Уклон балок и верхних поясов треугольной фермы сохранялся 1/4. Соединение колонн с балками и фермой шарнирное. Фундаменты под колонны устанавливались сборные железобетонные отдельно стоящие.

В другом варианте вместо крайних колонн и односкатных балок устанавливались Г-образные полурамы пролётом 10,5 м. Полурамы шарнирно опирались на фундаменты и на средние ряды колонн. Конструктивная и расчетная схемы поперечной рамы такого коровника приведены на рисунке 1.

а)



б)

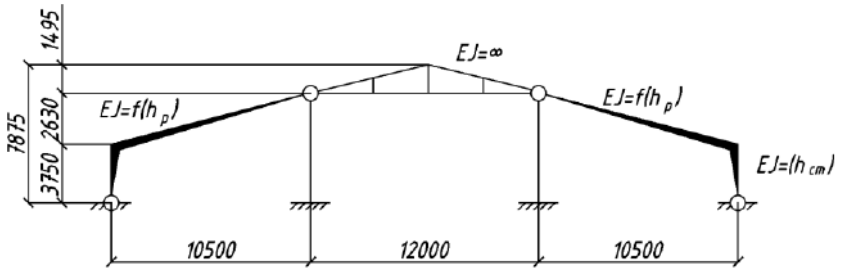
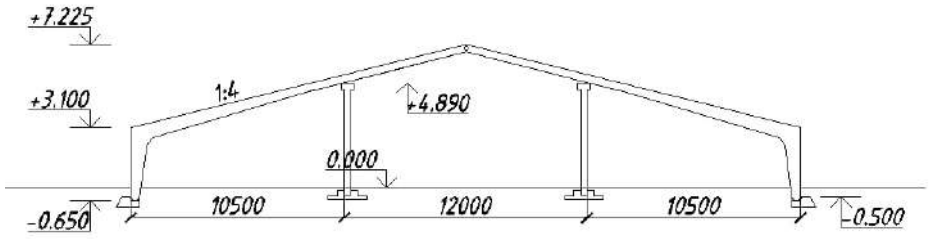


Рисунок 1 – Конструктивная (*а*) и расчетная (*б*) схемы поперечной рамы рамно-стоечного коровника

Предлагается заменить конструктивную схему поперечной рамы рамно-стоечного коровника шириной 33 м на рамную. Для этого запроектировать Г-образную полураму пролетом 16,5 м, а для уменьшения распора и изгибающего момента в ригелях трехшарнирной 33-метровой рамы установить стойки. Конструктивная и расчетная схемы такой поперечной рамы приведены на рисунке 2.

а)



б)

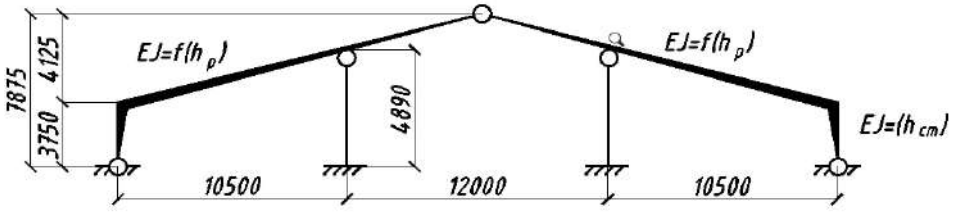


Рисунок 2 – Конструктивная (*а*) и расчетная (*б*) схемы поперечной рамы рамного коровника

Увеличение пролета влечет за собой увеличение распора и изгибающего момента в сечениях рамы. Установка стойки разделит ригель рамы на два пролета, он будет работать как двухпролетный неразрезной. За счет этого возникнет момент над стойкой, который уменьшит пролетные моменты и момент в месте соединения ригеля и стойки полурамы. Уровнем верха стойки можно будет регулировать изгибающие моменты, возникающие в сечениях по длине ригеля полурамы.

Для предлагаемой схемы поперечной рамы очевидна экономия материалов и трудозатрат при строительстве коровника, так как исключается ферма, перекрывающая средний пролет. Однако применение такой конструктивной схемы коровника требует детального расчета и проектирования полурамы, изготовления опытного образца и натурного испытания его.

УДК 69.003

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. В. КУРАК, З. Н. ЗАХАРЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Повышение энергоэффективности в жилищном строительстве становится приоритетом в условиях роста тарифов и экологических требований. Многоквартирные дома традиционной постройки теряют до 40–50 % тепла через ограждающие конструкции и вентиляцию, увеличивая нагрузку на бюджеты собственников и системы теплоснабжения. В отличие от типового строительства, ориентированного на минимизацию сметной стоимости, современный подход требует оценки затрат на всём жизненном цикле. Энергоэффективные технологии (утеплённые фасады, рекуперация, тепловые насосы, интеллектуальные системы управления) повышают инвестиционные расходы, но обеспечивают значительную эксплуатационную экономию.

Практика показывает, что базовые меры включают утепление стен и кровли минераловатными плитами или пенополистиролом, установку трёхкамерных стеклопакетов, монтаж приточно-

вытяжных установок с рекуперацией и автоматизированных узлов погодного регулирования. Однако каждая технология имеет существенные ограничения. Для фасадного утепления критичны срок службы креплений и защитного слоя: при нарушении технологии монтажа эффективность падает через 3–5 лет, а затраты на ремонт могут превысить годовую экономию. Тепловые насосы (с коэффициентом преобразования до 4–5) требуют дорогостоящего бурения или значительных площадей под грунтовые контуры, что в условиях плотной городской застройки часто экономически неоправданно.

В Беларуси пилотные проекты с поквартирным учётом тепла показали снижение потребления на 15–20 %, однако окупаемость счётчиков достигается лишь в квартирах площадью свыше 80 м² [3]. Рекуперация воздуха экономит до 60 % тепла на подогрев притока, но увеличивает эксплуатационные расходы на 10–12 % из-за регулярной замены фильтров [4].

К общим проблемам относятся:

– недостаточная квалификация проектировщиков и подрядчиков;

– слабая координация между застройщиками и эксплуатирующими службами;

– риск повреждения систем при небрежном монтаже;

– выбор утеплителя по минимальной цене без учёта долговечности и пожарной безопасности, что через 5–7 лет приводит к усадке и образованию мостиков холода.

В Беларуси имеется успешный опыт применения «пассивных» фасадов, грунтовых теплообменников и солнечных коллекторов, позволяющих снизить расход первичного топлива на 25–30 % [5, 6]. В ряде районов Минска введена обязательная сертификация зданий по классу не ниже «В» (годовой расход тепла ≤ 70 кВт·ч/м²), что стимулирует внедрение комплексных решений.

Для повышения экономической обоснованности предлагается на стадии технико-экономического обоснования перейти от сравнения капитальных затрат к оценке стоимости жизненного цикла (*Life Cycle Cost, LCC*) с дисконтированием на 25–30 лет. Эффективным инструментом является параметрическое энергомоделирование (программные комплексы ENERGO, TRNSYS), учитывающее климатические данные, ориентацию здания и внутренние тепловыделения. Для выбора оптимальной толщины утеплителя и светопрозрачных конструкций предложен инкрементальный анализ: оптимальный вариант определяется по точке пересечения кривых дополнительных вложений и накопленной экономии.

На экспериментальных площадках Брестской области испытываются гибридные системы (тепловой насос + газовый конденсационный котёл), получены фактические сезонные коэффициенты преобразования [7]. БелНИИС разрабатывает методику оценки с учётом динамики тарифов и углеродного следа строительных материалов [8].

На организационном уровне предлагается переход к непрерывному мониторингу фактического энергопотребления через АСУ ТП ЖКХ, собирающие данные с общедомовых и поквартирных приборов, а также метеостанций. Цифровая платформа позволяет проводить бенчмаркинг (сравнительный анализ) и выявлять объекты с аномальным расходом. Внедрение погодного регулирования и ночного снижения температуры в местах общего пользования дало сокращение теплопотребления на 12–15 %, а дистанционный сбор данных снизил издержки управляющих компаний на 8–10 % [9].

Контроль качества предлагается усилить обязательной тепловизионной съёмкой после строительства и в первые два года эксплуатации (не реже 1 раза в сезон), а также блиц-аэродверными испытаниями оконных и вентиляционных каналов. Полученные данные должны передаваться в центр управления для формирования реестра дефектов.

Экономический эффект достигается за счёт:

– снижения теплопотребления на 25–35 %;

– уменьшения затрат на капитальный ремонт инженерных систем на 15–20 %;

– сокращения платежей жильцов.

Срок окупаемости дополнительных вложений в утепление и рекуперацию не превышает 5–7 лет при ежегодном росте тарифов на уровне 8–10 %. Социальный эффект выражается в повышении комфортности проживания и снижении заболеваемости. В Беларуси доля домов с классом энергоэффективности не ниже «В» выросла с 30 % в 2022 г. до 48 % в 2025 г., на 2026 г. запланирован показатель 55 % [10, 11]. В рамках Государственной программы «Комфортное жильё и благоприятная среда» на 2026–2030 гг. предусмотрено субсидирование процентных ставок для застройщиков, что позволяет снизить стоимость квадратного метра для дольщиков на 8–10 % за счёт будущей экономии на коммунальных платежах.

Оценка эффективности энергоэффективных домов должна строиться на принципах полного учёта затрат и выгод за жизненный цикл. Сочетание качественного проектирования, применения надёжных материалов, внедрения интеллектуального учёта и проведения технического аудита обеспечивает значительный народно-хозяйственный эффект. Реализация предложенных рекомендаций не требует пересмотра действующих норм, но обеспечивает экономический выигрыш как для государства, так и для конечных потребителей. Направлениями дальнейших исследований являются адаптация разработанной методики к различным регионам и создание репрезентативных баз фактического энергопотребления для совершенствования прогнозирования и тарифной политики.

Список литературы

1 Государственная программа «Комфортное жильё и благоприятная среда» на 2026–2030 годы : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 31 дек. 2025 г. № 818. – Минск, 2025. – 85 с.

2 Директива Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. № 3 «Экономия и бережливость – главные факторы экономической безопасности государства» (с изм. и доп.) // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=11031&p0=P00700003(дата обращения: 08.08.2026)

3 СН 2.04.02-2020. Тепловая защита жилых и общественных зданий. Энергетические показатели. – Введ. 01.02.2021. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2021. – 33 с.

4 **Иванов, И. И.** Эксплуатационные аспекты рекуперации в многоквартирных домах / И. И. Иванов // Энергосбережение. – 2024. – № 4. – С. 21–27.

5 **Петров, П. П.** Пассивные фасады: опыт Беларуси / П. П. Петров // Строительная наука и техника. – 2023. – № 2. – С. 19–24.

6 **Сидоров, С. С.** Солнечные коллекторы в системе теплоснабжения МКД / С. С. Сидоров // Возобновляемая энергетика. – 2024. – № 1. – С. 4–6.

7 **Козлов, В. В.** Гибридные системы теплоснабжения: экспериментальные данные / В. В. Козлов // Инженерные системы. – 2025. – № 3. – С. 4–8.

8 **Морозова, Е. А**. Учёт углеродного следа при оценке эффективности / Е. А. Морозова // Вестник БелНИИС. – 2024. – № 5. – С. 7–11.

9 **Новиков, А. В.** Цифровизация ЖКХ: результаты пилотных проектов / А. В. Новиков // Умный город. – 2025. – № 1. – С. 6–12.

10 **Смирнова, О. Л.** Динамика энергетических классов жилого фонда / О. Л. Смирнова // Экономика строительства. – 2025. – № 4. – С. 19–23.

11 **Кузьмин, Д. В.** Социальные эффекты энергомодернизации / Д. В. Кузьмин // Жилищное хозяйство. – 2025. – № 2. – С. 16–17.

УДК 725.51:721.011.12:69.024.15

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ КРОВЛИ ДЛЯ РЕКОНСТРУИРУЕМОГО ЛЕЧЕБНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Д. С. ЛЕВЧУК, А. В. СТЕПАНОВА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Реконструкция объектов здравоохранения и лечебно-оздоровительных комплексов (ЛОК) представляет собой сложную градостроительную и инженерную задачу, поскольку часто посуществляется в стесненных условиях плотной городской застройки и, что наиболее важно, в условиях непрерывного функционирования действующего медицинского учреждения. Кровля в данном контексте выступает не просто ограждающей конструкцией, а критически важным элементом, обеспечивающим энергоэффективность, гидроизоляционную надежность, санитарно-эпидемиологическую безопасность и возможность размещения инженерного оборудования (вентиляционных камер, систем кондиционирования, водосточных воронок).

Актуальность темы обусловлена физическим и моральным износом кровельных покрытий значительной части существующих лечебных учреждений, построенных в середине и второй половине XX века. Традиционные наплавляемые битумные кровли, широко применявшиеся ранее, к настоящему времени исчерпали свой ресурс и не отвечают современным требованиям по теплоизоляции и надежности. При этом капитальный ремонт или полная замена крыши в условиях работающей больницы сопряжены с серьезными ограничениями.

Ключевая проблема выбора конкретного конструктивного решения заключается в необходимости обеспечения абсолютной герметичности и биологической безопасности. Протечки в медицин-

ских зданиях недопустимы из-за риска нарушения стерильности операционных блоков, палат интенсивной терапии и выхода из строя дорогостоящего диагностического оборудования (МРТ, КТ).

Вторая проблема – это жесткие ограничения по срокам и технологии производства работ. Реконструкция не должна прерывать лечебный процесс, следовательно, использование открытого огня (газовых горелок для наплавления битума), тяжелой подъемной техники и «мокрых» процессов должно быть исключено или минимизировано. Третья проблема связана с необходимостью размещения на кровле большого количества инженерного оборудования, требующего регулярного обслуживания.

Таким образом, формулировка проблемы сводится к поиску компромисса между высокой надежностью, энергоэффективностью, малым весом, пожарной безопасностью и скоростью монтажа кровельного покрытия в условиях плотной городской застройки и непрерывного функционирования лечебного комплекса.

Для решения данной проблемы предлагается обоснование применения инверсионной плоской кровли с механическим креплением полимерной мембраны и организацией эксплуатируемых зон. В отличие от классической кровли, где гидроизоляция находится сверху, в инверсионной системе гидроизоляционный ковер укладывается непосредственно на несущее основание (по уклону), а теплоизоляция – поверх него. Такое решение позволяет защитить гидроизоляцию от механических повреждений, ультрафиолетового излучения, перепадов температур и, что немаловажно для больниц, от возможных механических воздействий при обслуживании оборудования.

В качестве утеплителя в инверсионной системе целесообразно применять экструдированный пенополистирол (XPS), обладающий низким водопоглощением, высокой прочностью на сжатие и стабильностью геометрических размеров. В качестве гидроизоляционного ковра оптимально использовать армированную ПВХ-мембрану толщиной не менее 1,5 мм. Крепление мембраны к основанию осуществляется механическим способом (телескопическими крепежами) или с помощью балласта, что исключает использование открытого пламени.

Для выбора оптимального варианта был проведен сравнительный анализ двух основных типов покрытий: традиционной наплавляемой битумной кровли и современной инверсионной системы с ПВХ-мембраной по основным показателям:

1 Собственный вес и влияние на несущие конструкции. Наплавляемая битумная кровля в сборе с цементно-песчаной стяжкой и утеплителем обладает значительным весом. При реконструкции это требует тщательной проверки несущей способности существующих плит покрытия и часто приводит к необходимости усиления фундаментов и стен, что влечет за собой огромные дополнительные затраты и сложности. Инверсионная ПВХ-мембрана, напротив, отличается низким весом. Она не требует тяжелой стяжки, что позволяет минимизировать нагрузку на существующий каркас здания и избежать дорогостоящего усиления.

2 Срок службы и ремонтопригодность. Срок службы традиционной битумной кровли составляет в среднем 10–15 лет, после чего она требует капитального ремонта. Поиск протечек в многослойном битумном ковре крайне затруднен, а ремонт часто требует полного демонтажа участка. Инверсионная ПВХ-мембрана служит 25–30 лет. Благодаря тому, что гидроизоляция защищена слоем утеплителя, она не подвергается разрушительному воздействию ультрафиолета и перепадов температур. ПВХ-мембрана обладает высокой ремонтопригодностью: для устранения локального повреждения достаточно наложить заплатку с помощью горячего воздуха, не демонтируя всю систему.

3 Пожарная безопасность и влияние на лечебный процесс. Монтаж наплавляемой битумной кровли связан с использованием открытого огня (газовых горелок), что создает повышенную пожарную опасность, особенно на объектах здравоохранения, и сопровождается выделением едкого дыма и запаха. Это делает невозможным проведение работ без эвакуации пациентов и персонала. Инверсионная ПВХ-мембрана монтируется «холодным» способом (механическое крепление или балласт), что полностью исключает риск возгорания и минимизирует шум и грязь. Это позволяет проводить реконструкцию кровли без остановки работы лечебного комплекса.

Как показывают результаты сравнительного анализа, инверсионная мембранная кровля является более предпочтительным вариантом для реконструкции. Она позволяет снизить нагрузку на существующие фундаменты, обеспечивает высокую скорость монтажа за счет отсутствия мокрых процессов и позволяет в дальнейшем эксплуатировать поверхность кровли. Мембранные покрытия обладают высокой степенью ремонтопригодности, что позволяет проводить локальный ремонт без полного демонтажа системы, а также устойчивы к воздействию агрессивных сред и ультрафиолета.

Особое внимание при обосновании конструктивного решения следует уделить организации эксплуатируемых зон. Для лечебно-оздоровительного комплекса плоская кровля может выполнять функцию дополнительной рекреационной территории. Устройство «зеленой кровли» или террасы для прогулок пациентов (при условии обеспечения норм безопасности и доступности) позволяет компенсировать нехватку площадей на земле, особенно в условиях плотной застройки. Конструктивно это реализуется путем укладки поверх XPS-плит дренажного слоя, фильтрующего геотекстиля и плодородного грунта (или тротуарной плитки на регулируемых опорах). Важно отметить, что для медицинских учреждений предъявляются повышенные требования к пожарной безопасности таких зон, что требует применения негорючих материалов и устройства противопожарных поясов.

Применение инверсионных систем с полимерными мембранами и организацией эксплуатируемых зон представляет собой технически обоснованное, безопасное и экономически целесообразное решение, отвечающее современным стандартам реконструкции объектов здравоохранения. Данный подход позволяет не только продлить срок службы здания, но и повысить качество медицинского обслуживания за счет создания комфортной и безопасной среды.

УДК 658.513.4:001.895

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ МОНТАЖЕ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ

Д. С. МУЗЫЧЕНКО, О. Е. ПАНТЮХОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Инженерные сети (отопление, вентиляция, водоснабжение, электрика) – это «нервная система» здания: если что-то смонтировано с ошибкой, последствия бывают серьёзными. Традиционно сети собирают прямо на стройплощадке: сначала размечают, потом режут трубы и кабель, соединяют, проверяют. Такой способ сильно зависит от погоды, квалификации рабочих и даже от того, насколько удобно подойти к месту работ [1].

Модульный подход переносит большую часть работ в цех: там заранее собирают целые блоки (модули) с готовыми коммуникациями. На площадке модули просто ставят на место и соединяют между собой [2]. Важно понимать: это не «просто быстрее», а принципиально другой процесс, где качество закладывается на заводе, а не на площадке [3].

Актуальность темы обусловлена дефицитом квалифицированных рабочих кадров в строительстве, требованиями к сокращению сроков возведения объектов и формированием нормативной базы модульного строительства в странах СНГ [4, 5].

Что именно считается «инновационным» в модульном монтаже:

1 Prefabrication (заводская сборка модулей). Модуль – это не просто труба или короб, а готовый узел: с креплениями, изоляцией, маркировкой, иногда даже с финишной отделкой. На современных роботизированных производствах до 90 % всех операций по сборке, включая прокладку инженерных сетей, выполняются в цехах [3, 6].

2 BIM-моделирование. Это цифровая модель здания, где видно сразу всё: стены, перекрытия, трубы, кабели, вентиляцию. Коллизии (пересечения, когда труба «проходит сквозь» балку) видны ещё до стройки [7, 8]. BIM-программы (Revit, Renga MEP, Model Studio CS) генерируют чертежи и спецификации элементов инженерных систем, что синхронизирует процессы проектирования, производства и поставки модулей [9].

3 Plug-and-play соединения. Это стандартизованные разъёмы, которые исключают ошибки: физически нельзя подключить «не туда». Пример – система Wieland PREFAB®, обеспечивающая экономию времени монтажа до 70 % и экономию затрат до 30 % [10].

4 Автоматизация и роботизация. На заводе роботы сваривают, укладывают кабель, тестируют модуль. Это снижает влияние человеческого фактора [11]. Технологии VR позволяют специалистам «пройти» по будущему объекту и отработать последовательность монтажных операций до начала работ на площадке [6].

Сравним традиционный и модульный методы монтажа (таблица 1).

Таблица 1 – **Сравнение методов монтажа**

Параметр	Традиционный	Модульный
Время монтажа	100 %	−30–70 % [9, 11]
Трудозатраты	Высокие	−30 % [4]
Риск брака	Высокий	Минимизирован [10]
Зависимость от погоды	Сильная	Низкая [3]
Гибкость модернизации	Низкая	Высокая [5]
Контроль качества	На площадке	На заводе + испытания [10]

Модульные технологии – это переход от «собираем на месте» к «собираем в цехе и стыкуем на площадке». Сочетание заводской сборки модулей (prefabrication), BIM, стандартизованных соединений и автоматизации позволяет существенно ускорить монтаж, повысить качество и снизить зависимость от ручного труда [3, 6, 10, 11]. Для инженера это значит более предсказуемые сроки, стабильное качество и меньше переделок. Формирование нормативной базы и государственная поддержка создают предпосылки для масштабного внедрения технологии в ближайшие годы.

Для дальнейшего развития модульных инженерных систем необходимо решить ряд задач:

– разработать стандарты на штепсельные соединения инженерных коммуникаций между модулями;

– расширить библиотеки BIM-моделей модульного инженерного оборудования;

– синхронизировать процессы проектирования, производства и строительства для исключения простоев;

– обеспечить подготовку специалистов, способных работать с интегрированными BIM-модулями на всех этапах жизненного цикла объекта.

Информация о том, какие технологии дают эффект и насколько, представлена в таблице 2.

Таблица 2 – **Сравнительный анализ**

Технология	Суть	Эффект	Пример для понимания
Заводская сборка модулей (prefabrication)	Перенос работ в цех, типовые узлы	−40–60 % сроков, −25–30 % трудозатрат	Сантехкабина: привезли, поставили, подключили
BIM-моделирование	Цифровая модель, поиск пересечений	−70–80 % переделок, +20–30 % скорости проектирования	В BIM видно, что труба не проходит – исправляют на бумаге
Plug-and-play	Стандартизованные разъёмы	До −70 % времени на подключение, −30 % затрат	Как вилка и розетка: нельзя перепутать
Роботизация	Автоматизация сборки и контроля	−40–50 % ручного труда, стабильное качество	Роботы не устают и не ошибаются из-за спешки
VR-планирование	Виртуальная отработка операций	−30–40 % ошибок на площадке	Монтажники «проходят» маршрут в VR до стройки

Модульные технологии – это переход от «собираем на месте» к «собираем в цехе и стыкуем на площадке». Сочетание prefabrication, BIM, стандартизованных соединений и автоматизации позволяет существенно ускорить монтаж, повысить качество и снизить зависимость от ручного труда [3, 6, 10, 11]. Для инженера это значит более предсказуемые сроки, стабильное качество и меньше переделок.

Список литературы

1 **Сычев, С. А**. Технология скоростного монтажа полносборных зданий из высокотехнологичных строительных систем / С. А. Сычев // Жилищное строительство. – 2017. – № 1–2. – С.42–46.

2 **Самборская, О.** Инновации в строительстве: модульные технологии помогают преобразовывать города и села / О. Самборская // Строительная газета. – 2023. – 11 авг. – С. 2.

3 Модульное строительство как ответ на вызовы времени // Строительная газета. – 2025. – URL: https://stroygaz.ru/publication/technologies/modulnoe-stroitelstvo-kak-otvet-na-vyzovy-vremeni/ (дата обращения: 01.10.2026).

4 Модульный расчет: как ускорится строительство и когда без экспертизы не обойтись // Главгосэкспертиза России. – 2025. – URL: https://gge.ru/press-center/news/modulnyy-raschet-kak-uskoritsya-stroitelstvo-i-kogda-bez-ekspertizy-ne-oboytis/ (дата обращения: 01.10.2026).

5 Инновации в монтаже: как сэкономить ресурсы при создании инженерных систем // РСТМ-НС. – 2024. – URL: https://rstm.kz/kak-sekonomit-resursy-pri-sozdanii-inzhenernyh-sistem/ (дата обращения: 01.10.2026).

6 Интеграция инженерных систем ЛСТК // Завод ЛСТК – Сталь-профиль. – 2024. – URL: https://lstk.ru/integracziya-inzhenernyh-sistem-lstk/ (дата обращения: 01.10.2026).

7 **Фонтокина, В. А**. Роль BIM-технологий в организации и технологии строительства / В. А. Фонтокина, А. А. Савенко, Е. Д. Самарский // Вестник Евразийской науки. – 2022. – Т. 14, № 1. – URL: https://esj.today/PDF/06ECVN122.pdf (дата обращения: 01.10.2026).

8 **Антонов, И. Г.** BIM-технологии и их освоение / И. Г. Антонов. // Архитектура. – 2020. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/bim-tehnologii-i-ih-osvoenie/viewer / (дата обращения: 01.10.2026).

9 Electrical systems for modular builds // Wieland-Electric. – URL: https://www.wieland-electric.com/en/products/ (date of access: 01.10.2026).

10 A Review of life cycle construction process and cutting-edge technologyin prefabricated MEP installation engineering / G. Yan, Y. Yang, H. Zhang [et al.] // Buildings. – 2024. – № 14(3):630. – URL: https://www.mdpi.com/2075-5309/14/3/630 (date of access: 01.10.2026).

11 Перспектива применения блочно-модульных изделий в BIM-технологиях при строительстве систем тепло- и водоснабжения // Эксперт Урал. – 2021. – URL: https://expert-ural.com/archive/nomer-24-25-846/perspektiva-primeneniya-blochno-modulnih-izdeliy-v.html (дата обращения: 01.10.2026).

12 Анализ внедрения технологии информационного моделирования в Российских строительных компаниях по проектированию и строительству инженерных систем / В. С. Рашев, Н. С. Астафьева, Л. С. Рогожкин, В. Ю. Григорьев // Вестник Евразийской науки. – 2020. – № 3. – URL: https://esj.today/PDF/49SAVN320.pdf (дата обращения: 01.10.2026).

УДК 625.8

ПРИМЕНЕНИЕ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НАРУЖНЫХ СЕТЕЙ КАНАЛИЗАЦИИ

Ю. В. МУРАВЬЕВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Технология информационного моделирования зданий и сооружений (*Building Information Modeling, BIM*) представляет собой интегрированный цифровой процесс создания, управления и использования информации об объекте на протяжении всего жизненного цикла – от предпроектных исследований до эксплуатации и сноса. За последние десятилетия данный подход из инструмента архитектурного проектирования превратился в универсальную платформу для всех дисциплин строительного производства, включая проектирование сетей водоснабжения и канализации [1, 3].

Основным понятием методологии *BIM* является информационная модель – параметрически описанный трехмерный объект, каждый элемент которого содержит не только геометрические характеристики, но и семантические данные: материал, технические параметры, сведения об изготовителе, нормативные требования к монтажу и эксплуатации. Применительно к инженерным сетям BIM трактуется в широком смысле: это трехмерная геометрия трубопроводов, колодцев и оборудования в совокупности с полным набором атрибутивных данных, необходимых для проектирования, согласования и последующей эксплуатации систем канализации [1, 5].

Базовыми принципами *BIM*-технологий в инженерных сетях являются: единство информационной среды, при котором все участники проекта работают с одной моделью данных; параметрическое описание объектов, обеспечивающее автоматическое обновление связанных данных при изменении одного параметра; интероперабельность, т. е. возможность обмена данными между программными платформами посредством открытых форматов (*IFC, CityGML, LandXML*); многодисциплинарная координация, позволяющая выявлять коллизии между инженерными системами на стадии проектирования; а также управление жизненным циклом объекта – накопление и использование информации для технического обслуживания и реконструкции сети [1, 3].

Уровень проработки информационной модели принято характеризовать шкалой *Level of Development* (*LOD*) – от *LOD* 100 (концептуальная схема) до *LOD* 500 (исполнительная модель для эксплуатации). Для наружных сетей канализации на стадии проектирования рекомендуется достижение уровня *LOD* 300–350, обеспечивающего достаточную детализацию для разработки рабочей документации и проведения согласований [4, 5].

В русскоязычном профессиональном сообществе наряду с термином «*BIM*» используется его национальный эквивалент – «ТИМ» (технологии информационного моделирования), закрепленный в нормативных актах Беларуси и России. Концептуальная база ТИМ опирается на несколько измерений информационной модели: геометрическое (3*D*), временное (4*D* – привязка к календарному графику строительства), стоимостное (5*D* – интеграция со сметным нормированием), эксплуатационное (6*D*) и устойчивое (7*D* – оценка экологической и энергетической эффективности). Для проектирования наружных сетей канализации наибольшую практическую значимость имеют измерения

3*D*-5*D*, обеспечивающие точное определение трасс, планирование очередности прокладки сетей и автоматизацию подготовки сметной документации [1, 5].

Важным элементом современной концепции ТИМ является среда общих данных (СОД, *Common Data Environment*) – централизованное цифровое хранилище, обеспечивающее единую точку истины для всех участников проекта: заказчика, проектировщика, экспертизы и подрядчика. Организационное взаимодействие участников регламентируется планом реализации *BIM*-проекта (*BEP*), определяющим цели, уровень детализации модели, матрицу ответственности и порядок разрешения коллизий [5].

На международном уровне фундаментальными документами в области *BIM* являются серия стандартов *ISO* 19650, определяющая требования к управлению информацией на протяжении жизненного цикла объекта, а также стандарт *ISO* 16739-1:2024, закрепляющий структуру формата обмена данными *IFC*. В Республике Беларусь правовую основу применения ТИМ формирует Закон «Об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности», а на уровне технических нормативных правовых актов – СН 3.02.07-2020 «Объекты строительства. Классификация», СН 1.02.02- 2023 и СП 301.1325800.2017 [1, 3, 6–8].

Анализ указанных документов позволяет определить, что национальная нормативная база в области ТИМ находится в стадии активного формирования: существующие стандарты закладывают концептуальные основы информационного моделирования, однако не содержат детальных методических рекомендаций применительно к конкретным типам инженерных систем, в частности к наружным сетям канализации. Действующие технические документы – СН 4.01.02-2019 «Канализация. Наружные сети и сооружения» и СП 4.01.02-2022 «Сети наружной канализации и сооружения на них» – регламентируют технические требования к проектируемым объектам, но не устанавливают требований к форматам и процессам разработки документации с применением ТИМ, что создает нормативный пробел, требующий восполнения на методическом уровне [1, 3, 9, 10].

Выбор программной платформы является одним из значимых организационно-технических решений при переходе проектной организации на технологии информационного моделирования. *Autodesk AutoCAD* представляет собой универсальную САПР-систему, ориентированную на двумерное чертежное производство: объекты в нем представлены геометрическими примитивами, лишенными семантических атрибутов, что исключает автоматизированное формирование спецификаций и выполнение расчетов непосредственно по модели. *Autodesk Civi*l 3*D*, напротив, является специализированной платформой для проектирования инфраструктуры, оперирующей интеллектуальными параметрическими объектами – трассами, профилями и трубопроводными сетями (*Pipe Networks*) с полным набором атрибутивных данных [2, 3, 5].

Результаты сравнительного анализа двух платформ по основным техническим и организационно-экономическим критериям представлены в таблице 1 [2, 3].

Таблица 1 – **Сравнительный анализ платформ Autodesk AutoCAD и Autodesk Civil 3D**

Критерий сравнения	Autodesk AutoCAD	Autodesk Civil 3D
Тип модели	2D-геометрия, 3D ограничено	Параметрическая 3D-модель с атрибутами (ТИМ/BIM)
Объект «трубопроводная сеть»	Отсутствует (линии, полилинии)	Встроенный объект Pipe Network
Построение профиля	Вручную по точкам	Автоматически по цифровой модели рельефа
Выявление коллизий	Визуально, вручную	Автоматически (Interference Check)
Формирование спецификаций	Вручную / через блоки атрибутов	Автоматически из параметров объектов
Гидравлическая интеграция	Нет (внешние программы)	Экспорт в SewerGEMS, InfoWorks, SWMM
Поддержка IFC-обмена	Ограниченная (через плагины)	Встроенная (Civil 3D 2022+)
Совместная работа (СОД)	Через xRef и облачное хранение	Полная интеграция с Autodesk Docs / BIM 360
Стоимость лицензии	Ниже (доступен AutoCAD LT)	Выше (только полная версия Civil 3D)

Анализ данных таблицы 1 показывает принципиальные различия платформ по типу создаваемой модели: если *AutoCAD* является инструментом традиционного чертежного производства, то *Civil* 3*D* реализует базовые принципы ТИМ применительно к инфраструктурным объектам. Особого внимания заслуживают автоматическое построение продольного профиля трубопровода по цифровой модели рельефа и инструмент выявления коллизий (*Interference Check*), позволяющий обна-

руживать конфликты между элементами сети на стадии проектирования, а не строительства. Вместе с тем следует учитывать и ограничения *Civil 3D*: высокую стоимость лицензий, необходимость переобучения специалистов и отсутствие готовых отечественных баз данных трубопроводных изделий по ГОСТ, ТУ и ТКП [2–5].

Проведенный анализ показывает, что *BIM* (ТИМ) – комплексная методология цифрового информационного моделирования, обеспечивающая при проектировании наружных сетей канализации повышение качества и сокращение сроков разработки документации за счет автоматизации и инструментального выявления конфликтов. Нормативная база Беларуси содержит концептуальные стандарты в области ТИМ, однако нуждается в развитии отраслевых методических документов применительно к наружным сетям канализации. Сравнительный анализ программных платформ подтвердил преимущество *Autodesk Civil 3D* перед *AutoCAD* для решения задач *BIM*-проектирования данного типа сетей, что обосновывает выбор *Civil 3D* как основного инструмента при разработке рекомендаций по внедрению ТИМ в проектную практику [1, 2, 4, 5].

Список литературы

1 **Иващенко, Д. Н.** Рекомендации по внедрению BIM-технологий в проектирование наружных сетей водоснабжения и водоотведения / Д. Н. Иващенко, О. Б. Максимова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2020. – № 7 (88). – С. 102–118.

2 **Дорофеев, Ю. П.** Оптимизация проектирования наружных сетей водоотведения с применением BIM-моделей / Ю. П. Дорофеев, Л. М. Семенова // Инженерно-строительный журнал. – 2021. – № 10 (100). – С. 75–88.

3 **Попков, А. Ю.** Методические рекомендации по использованию BIM-технологий при создании проектов наружных сетей водопровода и канализации / А. Ю. Попков, В. Л. Курицын // Известия вузов. Строительство. – 2021. – № 10. – С. 65–72.

4 **Нестеров, А. В.** BIM-инструменты в проектировании наружных сетей водоотведения: практические аспекты и опыт реализации / А. В. Нестеров, Д. А. Денисов // Проблемы транспорта. – 2021. – № 4. – С. 58–67.

5 **Жуков, А. В.** BIM-технологии в проектировании наружных канализационных сетей / А. В. Жуков, С. П. Лебедев // Инженерно-строительный журнал. – 2023. – № 11. – С. 64–72.

6 СН 3.02.07-2020. Объекты строительства. Классификация. – Введ. 10.06.2021. – Минск : Минстройархитектуры, 2021. – URL: https://normy.by/tnpa/1/6972.pdf (дата обращения: 20.09.2026).

7 СН 1.02.02-2023. Состав и содержание проектной документации. – Введ. 02.10.2023. – Минск : Минстройархитектуры, 2023. – URL: https://normy.by/tnpa/1/8298.pdf (дата обращения: 20.09.2026).

8 СП 301.1325800.2017. Информационное моделирование в строительстве. Правила организации работ производственно-техническими отделами застройщика, технического заказчика. – Введ. 02.03.2018. – М. : Минстрой России, 2017. – URL: https://minstroyrf.gov.ru/tim/dokumenty/ (дата обращения: 20.09.2026).

9 СН 4.01.02-2019. Канализация. Наружные сети и сооружения. – Введ. 09.07.2020. – Минск : Минстройархитектуры, 2024. – URL: https://normy.by/tnpa/1/6621.pdf (дата обращения: 20.09.2026).

10 СП 4.01.02-2022. Сети наружной канализации и сооружения на них. – Введ. 10.03.2023. – Минск : Минстройархитектуры, 2023. – URL: https://ips3.belgiss.by/TnpaDetail.php?UrlId=677090 (дата обращения: 20.09.2026).

УДК 728:72.06

ЖИЛАЯ АРХИТЕКТУРА И КОМФОРТ

А. Д. НОВИК, А. С. ТУРОВЕЦ, В. М. ПРАСОЛ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Жилая архитектура – это не просто строительные конструкции, а сложная система, которая формирует материальную основу человеческого бытия. Жилое здание, которое мы видим сегодня, рассматривается не как статичный объект, а как динамическая среда, где пересекаются технические, социальные и психологические аспекты. Стены и крыша являются лишь оболочкой для защиты, тогда как архитектурный смысл жилья заключается в организации процессов жизнедеятельности: пространство проектируется как сценарий, распределяющий потоки движения, зоны приватности и места коммуникации.

Однако этим архитектурная сущность жилья не исчерпывается. Жилище выступает как первичный модуль социальной структуры, в которой отражаются и воспроизводятся культурные коды, иерархии и модели поведения, свойственные обществу в целом. В этом смысле жилая среда является не только архитектурным решением, но и активным фактором социализации: планировочные

решения, масштаб помещений, степень их изолированности или проницаемости – всё это задаёт определённые модели взаимодействия, формирует повседневные ритуалы и даже влияет на характер межличностных отношений. Дом становится местом, где частное и публичное постоянно переопределяют друг друга, а границы между ними подвижны и исторически изменчивы.

Важнейший аспект – антропоцентризм: жилая среда есть «третья кожа» человека, соответствующая его эргономике и психофизиологическим потребностям [1]. Если одежда защищает тело, а вторая кожа (в физиологическом смысле) отделяет внутреннюю среду организма от внешней, то жилище продолжает эту логику на уровне пространства, создавая буферную зону между человеком и агрессивной или безразличной внешней средой. При этом «третья кожа» не является пассивной оболочкой: она активно участвует в регуляции сенсорных потоков – света, звука, тепла, запахов, – и тем самым напрямую влияет на психоэмоциональное состояние, уровень стресса, качество сна и восстановительные процессы. Архитектурная антропология и средовая психология убедительно показывают, что игнорирование этих факторов ведёт к «архитектурному стрессу», симптомами которого становятся повышенная раздражительность, нарушения концентрации и чувство отчуждения.

Кроме того, жилая архитектура обладает временным измерением: она живёт во времени, стареет, адаптируется, перестраивается под новые нужды обитателей. Дом – это не застывший слепок момента, а биография, разворачивающаяся в пространстве. Смена поколений, изменение состава семьи, появление новых технологий и бытовых практик – всё это требует от жилой среды гибкости и способности к трансформации. Именно поэтому современная архитектура всё чаще отказывается от жёстких, монолитных планировок в пользу вариативных, трансформируемых решений, где стены могут быть не только физическими, но и условными, а функциональные зоны – перетекать друг в друга.

Наконец, жилище является зеркалом экологических и экономических реалий. Энергоэффективность, использование возобновляемых материалов, компактность, повторное использование и переработка – эти принципы постепенно становятся неотъемлемой частью проектирования жилья, превращая его из потребителя ресурсов в часть устойчивой системы жизнеобеспечения. Таким образом, жилая архитектура – это не просто укрытие, а сложный, многослойный феномен, в котором сплетаются телесность и культура, приватность и социум, традиция и инновация, природа и техника.

Эволюция понятия «комфорт» отражает путь цивилизации: от борьбы за выживание до высокотехнологичных экосистем, ориентированных на ментальное благополучие. На ранних этапах комфорт сводился к убежищу, защищающему от агрессивной среды. В эпоху Просвещения и промышленной революции понимание сместилось к физиологическим параметрам: гигиене, инсоляции, вентиляции. В XX веке функционализм связал комфорт с техническим оснащением, превратив жильё в «машину». В настоящее время комфорт многогранен и делится на три уровня: физический (микроклимат, акустика, эргономика), эстетический (гармония пропорций, натуральные материалы, биофилия) и социальный (качественная коммуникация и надёжная приватность).

Актуальность исследования связи жилой среды и здоровья обусловлена тем, что горожанин проводит в помещении до 90 % времени. Жильё сегодня – детерминанта общественного здоровья, влияющая на физиологическом и ментальном уровнях. Физическое здоровье зависит от качества воздуха, освещения и температурного режима: недостаток инсоляции ведёт к дефициту витамина D и нарушению циркадных ритмов, плохая акустика провоцирует сердечно-сосудистые заболевания, а экологически грязные материалы вызывают «синдром больного здания» [2]. Ментальное здоровье чувствительно к архитектурным решениям: теснота и отсутствие визуального разнообразия порождают сенсорную депривацию и стресс, тогда как биофильный дизайн снижает уровень кортизола [3]. Социальная изоляция в плотной застройке компенсируется «промежуточными» пространствами, формирующими соседские сообщества. Пример – Bosco Verticale в Милане, где деревья на террасах очищают воздух, снижают шум и создают визуальный комфорт лесной среды в центре города.

Архитектурный комфорт складывается из пространственных, физических и эстетических факторов. Пространственный комфорт базируется на эргономике и зонировании: выделяются зоны активности и приватности, учитывается логика перемещений, исключаются «мёртвые» зоны, обеспечивается гибкость под меняющиеся нужды. Микроклиматический комфорт включает инсоляцию, акустику, качество воздуха и тепловой баланс. Визуальный комфорт отвечает за эстетическое восприятие: масштаб, цвет, текстуры, соразмерность пропорций и вид из окна. Средовой комфорт

расширяет понятие дома за пределы квартиры: общественные пространства внутри здания (лобби, коворкинги), двор без машин с качественным озеленением и инфраструктурная доступность по концепции «15-минутного города» [4].

Современные тренды формируются на стыке цифровой революции и экологического манифеста. «Умный дом» превратился в систему интеллектуальных сценариев, подстраивающихся под биоритмы человека. Совершенствуется устойчивое развитие и энергоэффективность: «пассивный дом», тепловые насосы, солнечные панели, перекрестно-клееная древесина CLT. Биофильный дизайн интегрирует природу в архитектуру. Гибкость и модульность пространств позволяют трансформировать жильё под меняющиеся задачи. В совокупности эти тренды ведут к «регенеративной» архитектуре, которая восстанавливает здоровье человека и окружающей среды.

Современная жилая архитектура – фундаментальный инструмент обеспечения физического и ментального здоровья. Комфорт трансформировался из примитивного укрытия в сложную экосистему, где эргономика, микроклимат и эстетика формируют психологическое благополучие. Качественная среда обитания включает не только квартиру, но и внешнее пространство: от дворов до цифровой инфраструктуры. Будущее архитектуры – в создании адаптивной и регенеративной среды, которая за счёт технологий и природного баланса восстанавливает ресурсы человека, превращая проектирование зданий в проектирование качества жизни.

Список литературы

1 Третья кожа Хундертвассера // Русская Майолика. – URL: https://www.russian-mayolica.ru/our-story/hudozhniki-keramisty/third-skin-hundertwasser/?Ysclid=mtzjgtgaic116266969 (дата обращения: 13.09.2026).

2 **Киндсфатер, В. И.** Синдром больного здания (помещений) / В. И. Киндсфатер // Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Калининградской области. – 2019. – 8 декабря. – URL: https://39.rospotrebnadzor.ru/content/sindrom-bolnogo-zdaniya-pomeshcheniy (дата обращения: 13.09.2026)

3 **Оразов, К.** Биофильный дизайн: интеграция природы в городскую архитектуру / К. Оразов, П. Чолуков, А. Гурбанов. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/biofilnyy-dizayn-integratsiya-prirody-v-gorodskuyu-arhitekturu (дата обращения: 13.09.2026).

4 **Кондратенко, Т. О.** Градостроительная концепция «15-минутный город» / Т. О. Кондратенко, А. Н. Корнев // Молодой исследователь Дона. – 2025. – № 10(5). – С. 156–159.

УДК 628.2/.3

ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ И МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ ГОМЕЛЬСКОГО РАЙОНА

О. К. НОВИКОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

А. В. ПАПКОВ
ГП «Гомельводоканал», Республика Беларусь

Надежное функционирование систем водоотведения и надлежащее качество очистки сточных вод являются фундаментальными условиями обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия и экологической безопасности территорий. В настоящее время водопроводно-канализационное хозяйство, особенно в малых и средних населенных пунктах, сталкивается с серьезными проблемами: нарастающим физическим износом сетей и моральным устареванием технологий очистки, спроектированных несколько десятилетий назад. На фоне строгих требований к защите окружающей среды своевременный мониторинг технического состояния очистных сооружений и разработка путей их комплексной модернизации представляют собой одну из наиболее актуальных задач жилищно-коммунального комплекса [1].

Для обеспечения качественного оказания услуг населению на обслуживании государственного предприятия «Гомельводоканал» находятся 2 031 объект водоснабжения и 926 объектов водоотведения, водопроводные сети общей протяженностью 7,7 тыс. км и сети водоотведения (канализации) общей протяженностью 3,5 тыс. км. Из них количество сетей со сверхнормативным сроком эксплуатации составляет 21,5 % от общей протяженности. Распределение сетей по материалам показывает

преобладание полимерных (48 %), чугунных (25 %) и керамических (14 %) труб. Анализ диаметров трубопроводов свидетельствует о преобладании трубопроводов диметрами до 300 мм, что характерно для самотечных систем канализации малых и средних населенных пунктов.

Обеспеченность централизованным водоотведением в городах Гомельской области составляет более 83 %, тогда как в агрогородках и сельских населенных пунктах этот показатель снижается до 39,29 и 25,62 % соответственно, что указывает на широкое применение децентрализованных схем отведения сточных вод. На территории Гомельской области государственным предприятием «Гомельводоканал» эксплуатируется 221 очистное сооружение, из них 12 – искусственной биологической очистки, 209 – естественной биологической очистки. Анализ показывает, что значительная часть этих объектов была введена в эксплуатацию более 30–40 лет назад и в настоящее время характеризуется высоким уровнем физического износа, достигающим 60–80 % в малых городах и поселках городского типа. Технологические схемы очистки на данных очистных сооружениях, включающие решетки, песколовки и аэротенки или биофильтры и вторичные отстойники, в современных условиях показывают недостаточную эффективность при удалении биогенных элементов (соединений азота и фосфора).

В Гомельском районе эксплуатируется 208,6 км канализационных сетей, из которых 18,6 % превысили нормативный срок службы. Система водоотведения района включает 16 объектов естественной биологической очистки (поля фильтрации) и лишь одни очистные сооружения искусственной биологической очистки, расположенные в н. п. Зябровка.

Очистные сооружения в н. п. Зябровка были построены в 1971 году и в настоящее время принимают сточные воды со значительной сезонной неравномерностью (максимальный приток в апреле и минимальный в сентябре).

В результате проведенного обследования очистных сооружений н. п. Зябровка установлено неудовлетворительное состояние данного объекта:

– подводящая сточную воду в приемную камеру труба частично разрушена коррозией;

– наблюдается разрушение кирпичной кладки приемной камеры;

– конструкция решетки деформирована и покрыта ржавчиной;

– железобетонные стенки песколовки подвержены коррозии, на выходе из горизонтальной песколовки лоток выполнен из сборных железобетонных элементов, не соединенных между собой;

– железобетонные элементы конструкции двухъярусных отстойников частично разрушены и подвержены коррозионному износу, отсутствует перекрытие отстойников, нарушено ограждение, отсутствуют технологические мостики;

– все биофильтры (3 шт.) не эксплуатируются, бетонные стены разрушены;

– вторичные отстойники находятся в аварийном состоянии и являются технически неисправными, наблюдается коррозионный износ труб вторичных отстойников, разрушен верхний слой бетона сборных лотков вторичных отстойников;

– имеются застойные зоны в биопрудах (места скопления осадка), происходит зарастание прудов;

– большинство железобетонных лотков находится в неудовлетворительном состоянии.

Песок из песколовок удаляется вручную и складируется вблизи песколовок.

Осадок из двухъярусных отстойников поступает на иловые площадки, состоящие из 4 карт, общей площадью 500 м^2. Площадки выполнены на естественном основании с поверхностным отводом воды. Существующее здание насосной станции имеет 100%-й износ. Выпуск очищенных сточных вод осуществляется по самотечному трубопроводу в существующую водоотводную канаву и далее в р. Уть.

Вследствие сильного износа оборудования и отсутствия полноценной биологической очистки, фактические концентрации загрязняющих веществ на выпуске значительно превышают допустимые концентрации по биохимическому и химическому потреблению кислорода, а также по содержанию аммонийного азота.

Сооружения естественной биологической очистки Гомельского района также характеризуются физическим износом и моральным устареванием применяемых технологий. Типовая схема таких объектов включает приемную камеру, песколовку, двухъярусный отстойник и карты полей фильтрации.

На основании обследования очистных сооружений населенного пункта Бобовичи было установлено, что существующие четыре карты полей фильтрации полностью заполнены и работают с повышенной гидравлической нагрузкой из-за отсутствия резервных площадей. Это не позволяет свое-

временно выводить карты из эксплуатации для проведения вспашки, что ведет к заиливанию грунта, потере его водопроницаемости и снижению качества почвенной доочистки. На сооружениях и оборудовании механической очистки зафиксированы многочисленные разрушения бетона, сквозная коррозия лотков и трубопроводов, а также неравномерное распределение сточных вод по картам полей фильтрации, приводящее к деградации и зарастанию неиспользуемых участков. Однако при должном уходе и регулярной вспашке грунта, как это организовано в населенных пунктах Азделино и Марковичи, такие сооружения способны функционировать стабильно и обеспечивать очистку.

В населенных пунктах Долголесье, Михальки, Роги и Глыбоцкое очистные сооружения были полностью выведены из эксплуатации предыдущей эксплуатирующей организацией. В данных населенных пунктах канализационные сети выполняют функцию накопителей, из которых сточные воды по графику вывозятся ассенизационной техникой на действующие поля фильтрации. Подобный режим работы является вынужденным, характеризуется высокими эксплуатационными затратами и создает существенные риски загрязнения подземных и поверхностных вод.

На основании проведенного обследования установлено, что существующая система водоотведения Гомельского района требует комплексной модернизации. Работа объектов в накопительном режиме и эксплуатация полей фильтрации не отвечают современным требованиям экологической безопасности. Основными направлениями развития должны стать восстановление работоспособности канализационных насосных станций, реконструкция узлов механической очистки с применением современных антикоррозийных материалов, а также внедрение современных технологий биологической очистки, адаптированных к условиям малых населенных пунктов с неравномерным притоком сточных вод.

Список литературы

1 **Ануфриев, В. Н**. Рекомендации по организации водоотведения в сельской местности / В. Н. Ануфриев. – Минск : Позитив-центр, 2014. – 60 с.

УДК 624.151.6

МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ

Д. П. НОВИЦКИЙ, М. В. БЕСПАЛОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В процессе реконструкции зданий – надстройки этажей, замены перекрытий, изменения технологических нагрузок – несущая способность существующих ленточных фундаментов часто оказывается недостаточной. Своевременное и технически обоснованное усиление фундаментов является ключевым условием безопасности и долговечности реконструируемых объектов. В Республике Беларусь проектирование усиления оснований регламентируется СП 5.01.01-2023 [1]. В настоящей статье рассмотрены основные методы усиления ленточных фундаментов, применяемые в отечественной практике, с учётом нормативных требований и современных технологических решений.

Повреждения ленточных фундаментов проявляются в виде трещин, неравномерных осадок, искривлений стен. Основные причины: увеличение нагрузок, изменение гидрогеологических условий, ошибки проектирования, физический износ материала [2]. Перед выбором метода усиления необходимо провести комплексное техническое обследование, включающее лабораторные испытания грунтов и материалов фундамента [3]. На этом этапе определяют фактические геометрические размеры, прочность бетона (камня), глубину заложения, наличие пустот и дефектов, а также характеристики грунтов основания – модуль деформации, угол внутреннего трения, сцепление, влажность. По результатам обследования выполняют поверочные расчёты несущей способности существующего фундамента при новых нагрузках и устанавливают требуемую величину усиления.

Классификация методов усиления. По способу передачи дополнительной нагрузки различают: увеличение площади подошвы (уширение), устройство дополнительных опорных элементов (сваи, столбы), перераспределение нагрузки внутри существующей конструкции (обоймы, предварительное напряжение). По технологии выполнения – методы с разработкой грунта (траншеи, приямки) и

без неё (инъекционные). По применяемым материалам – бетонные, железобетонные, стальные, композитные и комбинированные [4].

Уширение подошвы фундамента. Наиболее традиционный метод – устройство монолитных железобетонных плит уширения с внешней стороны ленты. Работы включают разработку траншей, бетонную подготовку, армирование и бетонирование. Данный способ эффективен при увеличении нагрузки на 20–50 % и хороших грунтовых условиях. В белорусской практике часто применяют контрфорсы, связывающие существующий фундамент с новой плитой [5].

Железобетонные обоймы. Обойма охватывает фундамент с одной или двух сторон и работает совместно с ним. Технология включает устройство траншей, очистку поверхности, насечку для сцепления, установку арматурного каркаса с анкеровкой в тело фундамента, бетонирование. Двухсторонняя обойма более надёжна, но требует большего пространства. Этот метод особенно эффективен для бутовых и бутобетонных фундаментов, имеющих низкую прочность материала [6].

Инъекционные методы. К современным щадящим технологиям, не требующим масштабных земляных работ, относятся:

– укрепительная цементация – нагнетание цементного раствора в тело фундамента и грунт для заполнения пустот и повышения прочности;

– инъекционные сваи – бурение скважин через фундамент с последующим заполнением бетоном и армированием. Как показывают исследования белорусских авторов, такие сваи особенно эффективны в глинистых грунтах [7];

– инъекционные анкеры – установка анкерных элементов с последующей инъекцией связующего состава.

Усиление с использованием свай. При значительном увеличении нагрузки применяют комбинированные фундаменты, где существующая лента работает совместно со сваями.

Способы устройства:

– задавливание свай из штолен (горизонтальных выработок под подошвой) с упором в существующую плиту;

– устройство буроинъекционных вертикальных или наклонных свай;

– усиление горизонтальными армоэлементами, размещаемыми вплотную к подошве фундамента [8].

В последние годы в Беларуси активно применяются самозабуриваемые винтонабивные микросваи, которые позволяют передавать нагрузку на более глубокие слои грунта без вибрации и шума, что важно в условиях плотной городской застройки [9].

Комбинированные и предварительно напряжённые методы. В сложных случаях сочетают уширение с инъекционными сваями или обойму с предварительно напряжённой арматурой. Предварительное напряжение позволяет эффективно перераспределять усилия и разгружать существующий фундамент. Патентные разработки белорусских специалистов предлагают комбинированный ленточный фундамент, объединяющий элементы разных типов [10].

Современный арсенал методов усиления ленточных фундаментов включает как традиционные (уширение подошвы, устройство обойм), так и высокотехнологичные (инъекционные технологии, различные виды свай, предварительное напряжение) подходы. Каждый метод имеет свою область рационального применения, определяемую величиной требуемого увеличения несущей способности, инженерно-геологическими условиями, стеснённостью строительной площадки, техническим состоянием фундамента и архитектурными ограничениями. Выбор оптимального варианта требует комплексного инженерного анализа, включающего детальное обследование, расчётное моделирование взаимодействия системы «фундамент – грунт» с учётом совместной работы старых и новых элементов, а также оценку экономической целесообразности и технологической доступности. Приоритет следует отдавать методам, обеспечивающим минимальное вмешательство в основание и максимальное сохранение существующих конструкций, особенно для зданий-памятников.

Дальнейшее развитие технологий, в том числе совершенствование расчётных моделей комбинированных фундаментов, внедрение цифровых систем мониторинга напряжённо-деформированного состояния в процессе усиления, а также адаптация методов к специфическим грунтовым условиям Беларуси (например, к лессовидным суглинкам и моренным отложениям) позволит существенно повысить надёжность и долговечность реконструируемых зданий при одновременной минимизации затрат и сроков работ. Особого внимания заслуживают разработка унифицированных

алгоритмов проектирования для типовых случаев усиления и создание специализированных программных комплексов, учитывающих как отечественные нормативные требования [1], так и передовой международный опыт. Активное внедрение рассмотренных методов в практику реконструкции будет способствовать продлению жизненного цикла зданий, повышению эффективности капиталовложений и сохранению архитектурного облика городов Беларуси.

Список литературы

1 СП 5.01.01-2023. Общие положения по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений. – Введ. 15.05.2023. – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2023. – 150 с.

2 **Филимонов, Д. В.** Усиление ленточных и столбчатых фундаментов : учеб.-метод. пособие / Д. В. Филимонов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2011.

3 **Кондратчик, А. А.** Железобетонные конструкции : учеб.-метод. комплекс : в 6 ч. Ч. 6: Усиление строительных конструкций зданий и сооружений / А. А. Кондратчик. – Брест : БрГТУ, 2019. – 177 с.

4 **Потапенко, П. Н.** Оптимизация нагрузок на фундамент на примере архитектурной реконструкции малого жилого дома / П. Н. Потапенко, А. С. Олиферко. – Минск : БНТУ, 2024.

5 **Янушкевич, К. Е.** Уширение фундаментов / науч. рук. К. М. Каменецкая ; К. Е. Янушкевич, К. А. Рахунок. – Минск : БНТУ, 2024.

6 Усиление монолитными железобетонными обоймами фундаментов: E46-1-1 // Беленир. – URL: https://belenir.com/code/%D0%9546-1-1 (дата обращения: 03.09.2026).

7 **Кремнев, А. П.** Усиление фундаментов существующих зданий при помощи металлических свай, устраиваемых в защитной среде цементного раствора / А. П. Кремнев // Геотехника Беларуси: наука и практика : материалы Междунар. науч.-технич. конф., посвящ. 60-летию кафедры оснований, фундаментов и инженерной геологии и 90-летию со дня рождения про-фессора Юрия Александровича Соболевского (Минск, 23–25 окт. 2013 г.) : в 2 ч. – Минск : БНТУ, 2013. – Ч. 2. – С. 166–170.

8 **Моххамад, Х. М.** Буроинъекционное упрочнение оснований зданий и сооружений при реконструкциях : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Моххамад Хелло Муса. – Минск, 1998. – 196 с.

9 Залеский, Д. В. Усиление фундаментов существующих зданий с помощью самозабуриваемых винтонабивных микросвай / Д. В. Залеский, Н. Д. Голуб // Научный форум. – 2023. – URL: https://nauchforum.ru. (дата обращения: 03.09.2026).

10 Патент 6204 U Респ. Беларусь, МПК (2009) E 02D 27/01. Комбинированный ленточный фундамент : опубл. 30.04.2010 / М. С. Грицук ; заявитель Брестский государственный технический университет.

УДК 628.2/.3

АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПРОБЛЕМ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

А. В. ПАПКОВ
ГП «Гомельводоканал», Республика Беларусь

В современных условиях развития жилищно-коммунального хозяйства обеспечение экологически безопасного и устойчивого функционирования систем водоотведения в малых и сельских населенных пунктах является одной из наиболее острых проблем. В отличие от крупных городов с их мощными централизованными системами отведения и очистки сточных вод, инфраструктура малых населенных пунктов отличается упрощенными технологическими схемами, высокой степенью износа и ограниченными финансовыми возможностями для реконструкции. В значительной части таких населенных пунктов либо вообще отсутствует централизованная система водоотведения, либо применяются сооружения естественной биологической очистки, которые зачастую находятся в неудовлетворительном состоянии. Длительное недофинансирование, разрушение конструкций и снижение объемов сточных вод из-за оттока населения приводят к тому, что системы водоотведения малых населенных пунктов работают в нерасчетных режимах, а качество очистки снижается. Особенно актуальна эта проблема для населенных пунктов, в которых отсутствуют очистные сооружения, а система функционирует в режиме накопления сточных вод, которые затем вывозятся ассенизационными машинами, что влечет за собой высокие эксплуатационные затраты и экологические риски. В связи с этим возникает острая необходимость разработки обоснованных рекомендаций по модернизации систем водоотведения с учетом реальных объемов сточных вод и перспектив развития территорий.

Согласно исследованиям многих специалистов, во многих районах до 20 % населения используют септики и выгребные ямы, а часть жителей и вовсе не имеет доступа к системам водоотведения [1]. Износ сетей, превышение сроков эксплуатации сооружений и оборудования, устаревшие технологии очистки являются основными причинами поступления неочищенных сточных вод в водные объекты. Высокая степень износа труб, недостаток инвестиций, значительное количество бесхозных объектов и отсутствие учета перспектив развития населенных пунктов серьезно сдерживают планомерное развитие отрасли.

В структуре водохозяйственного комплекса сохраняется выраженная инженерная диспропорция: уровень обеспеченности централизованными системами водоснабжения и водоотведения у городских потребителей существенно превосходит аналогичные показатели для сельских территорий. Если в городах канализацией обеспечено подавляющее большинство жителей, то в сельской местности централизованными сетями охвачен лишь небольшой процент. Низкая плотность населения обуславливает малые расходы сточных вод, из-за чего трубы приходится прокладывать с большим уклоном и на значительной глубине, а иногда и необоснованно строить дополнительные повысительные насосные станции.

Отличительной особенностью сточных вод малых населенных пунктов является резкое колебание их объемов в течение суток и высокие удельные нагрузки по загрязняющим веществам. Изучение качества поступающих сточных вод показывает высокое содержание взвешенных веществ, органических соединений, аммонийного азота и фосфатов. Очистные сооружения часто функционируют с организационными и технологическими нарушениями: перерывами в подаче сточных вод, резкими колебаниями температуры воды, образованием осадков в усреднителях, повышенным пенообразованием в аэротенках и выносом активного ила из вторичных отстойников. В таких условиях многолетняя практика показывает, что применение типовых проектных решений, рассчитанных на крупные города, без учета локальных условий приводит к снижению эффективности систем. Недостаточный контроль за локальными децентрализованными очистными сооружениями и несвоевременный ремонт усугубляют санитарно-экологические риски. Низкая плотность застройки и ограниченное финансирование требуют поиска экономически обоснованных технических решений, специально адаптированных для малых населенных пунктов.

Анализ существующих систем водоотведения показывает, что каждая из них имеет свои особенности эксплуатации. Самотечная, или гравитационная, система наиболее проста в устройстве и требует минимальных затрат электроэнергии. Однако при большой удаленности объектов друг от друга она требует прокладки труб увеличенного диаметра с большим уклоном, что ведет к заглублению сетей и существенному удорожанию строительно-монтажных работ, а также сохраняет опасность возникновения коррозии.

Надежность самотечной канализации сильно зависит от срока службы труб, большинство из которых выполнены из керамики и чугуна и эксплуатируются более тридцати лет, что приводит к разрушению сводов труб и нарушению раструбных соединений, особенно на участках малого и среднего диаметра [2]. Альтернативой выступает напорная система, которая позволяет использовать герметичные трубы малого диаметра и прокладывать их на минимальной глубине, предотвращая коррозию. Но такая система требует установки насоса на каждом объекте, что ведет к значительным расходам электроэнергии и необходимости постоянного технического обслуживания оборудования для предотвращения его блокировки и засорения.

Вакуумная канализация представляет собой еще один вариант, где сточные воды транспортируются за счет отрицательного давления, создаваемого центральной вакуумной станцией. Эта система исключает засорение труб благодаря высокой скорости потока, не требует глубоких траншей и позволяет использовать гибкие полимерные трубы, легко обходящие препятствия. Полная герметичность системы исключает утечки и запахи, что дает возможность прокладывать сети рядом с водопроводом или в водоохранных зонах. Электроэнергия расходуется только на работу центральной станции. К недостаткам вакуумной системы относятся жесткое ограничение протяженности сети из-за потери напора, необходимость применения очистки воздуха от сероводорода на станции, постоянное обслуживание механических контроллеров клапанов и потребность в квалифицированных специалистах для проектирования и эксплуатации.

В условиях рассредоточенной застройки также применяются децентрализованные системы, которые избавляют от необходимости строить протяженные уличные коллекторы, но взамен требуют устройства и содержания локальных очистных сооружений на каждом отдельном объекте.

Методы очистки сточных вод в малых населенных пунктах базируются преимущественно на естественных биологических процессах, так как они отличаются технологической простотой и низкими энергозатратами. Механическая очистка с использованием решеток, песколовок и отстойников применяется для удаления крупного мусора и взвесей, но не снижает уровень органики до нормативов. Для основной очистки часто используются поля фильтрации, которые представляют собой разделенные земельные участки, где вода проходит через поры грунта и очищается почвенными микроорганизмами. Такие поля выполняют функцию природного барьера, но их эффективность нестабильна из-за склонности к заиливанию поверхности и зарастанию кустарником. Без регулярного обслуживания, восстановления обваловки и очистки поверхности фильтрационная способность грунтов падает, что приводит ко вторичному загрязнению среды. В свою очередь, компактные установки заводского изготовления обеспечивают глубокую очистку с процессами нитрификации и денитрификации. Они автоматизированы и компактны, но крайне чувствительны к залповым сбросам сточных вод, перепадам температур в зимний период и требуют бесперебойного электроснабжения, а также наличия резервуаров-усреднителей.

Для очистки сточных вод малых населенных пунктов также применяются грунтово-растительные площадки, где очистка происходит при прохождении осветленных сточных вод через слой песка или гравия при активном участии корневой системы высаженных влаголюбивых растений. Эти сооружения надежны, экологичны и просты в устройстве, но требуют обязательного предварительного осветления сточных вод в септиках для предотвращения кольматации фильтрующей загрузки.

Биологические пруды используют процессы самоочищения с участием водорослей, микроорганизмов и водной растительности. Они обеспечивают высокое качество доочистки, требуют минимальных затрат, но занимают значительные площади и нуждаются в периодическом удалении накапливающегося на дне осадка и отмершей биомассы [3].

Для индивидуальных жилых домов основным элементом автономной канализации остается септик, в котором происходит отстаивание и частичное анаэробное разложение органики с последующим направлением осветленной воды на сооружения подземной почвенной фильтрации. Такие системы энергонезависимы и экономичны, что делает их оптимальным выбором при малых расходах, в то время как сложные аэрационные установки целесообразно применять только при наличии условий для их стабильного обслуживания.

На основании анализа состояния систем водоотведения установлено наличие комплекса проблем, связанных с высоким износом сетей, низкой долей централизованной канализации и несоответствием фактических режимов работы сооружений их изначальным проектным параметрам. Типовые технические решения, успешно применяемые в крупных городах, оказываются нежизнеспособными в малых населенных пунктах из-за резких гидравлических колебаний и состава сточных вод. Внедрение альтернативных технологий, таких как вакуумная или напорная канализация, а также использование методов естественной очистки на базе грунтово-растительных площадок, биологических прудов и септиков, обладает значительным потенциалом, но требует обязательного технико-экономического обоснования в каждом конкретном случае. Только детальное инженерное обследование действующих систем и строгий учет местных климатических, гидрогеологических и социально-экономических условий позволят разработать эффективные практические рекомендации по поэтапной реконструкции, гарантирующей экологическую безопасность и высокую надежность водоотведения в малых населенных пунктах.

Список литературы

1 **Новикова, О. К.** Системы канализации малых населенных пунктов: текущая ситуация и проблемные аспекты / О. К. Новикова, А. Б. Невзорова // Труды БГТУ. Сер. 2: Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2020. – № 2 (235). – С. 183–188.

2 **Новикова, О. К.** Канализационные сети : учеб. пособие / О. К. Новикова. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 179 с.

3 **Ануфриев, В. Н**. Рекомендации по организации водоотведения в сельской местности / В. Н. Ануфриев. – Минск : Позитив-центр, 2014. – 60 с.

УДК 628.2/.3

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

А. В. ПАПКОВ
ГП «Гомельводоканал», Республика Беларусь

Эксплуатируемые очистные сооружения малых населенных пунктов характеризуются моральным и физическим износом и не соответствуют действующим требованиям к качеству очистки сточных вод [1]. В связи с этим требуется обоснование приоритетных направлений модернизации, направленных на повышение эффективности очистки сточных вод и улучшение санитарно-экологического состояния территорий малых населенных пунктов [2].

Для разработки проектных решений по реконструкции или модернизации очистных сооружений их производительность следует определять на основе фактического притока сточных вод с учетом перспективы увеличения нагрузок, обусловленной развитием системы канализации и возможным переподключением сетей водоотведения соседних населённых пунктов.

На основании анализа систем водоотведения малых населенных пунктов и технических решений в области отведения и очистки сточных вод разработаны рекомендации по их модернизации, учитывающие численность жителей, наличие системы водоотведения, текущее состояние сетей канализации и очистных сооружений, а также перспективы развития населенного пункта (рисунок 1).



Рисунок 1 – Рекомендации по модернизации систем водоотведения малых населенных пунктов

При значительном физическом и моральном износе сооружений механической и биологической очистки сточных вод рекомендуется полная замена существующей ступени механической очистки с внедрением современного автоматизированного оборудования. При этом следует предусматривать механизированные решетки для задержания крупных отбросов.

Для повышения эффективности работы песколовок целесообразно применение песковых насосов, гарантирующих более надежное удаление песчаной пульпы по сравнению с эрлифтами. В целях снижения капитальных затрат на реконструкцию и оптимизацию технологической схемы очистки рекомендуется строительство компактного блока очистных сооружений, включающего первичные отстойники, аэротенки и вторичные отстойники. При концентрации взвешенных ве-

ществ в поступающих сточных водах менее 150 мг/дм³ в составе технологической схемы очистки допускается отказ от стадии первичного отстаивания, так как ее применение не оказывает существенного влияния на эффективность последующих биологических процессов.

Для улучшения экологической обстановки и сокращения площадей, занятых иловыми площадками, рекомендуется предусматривать сооружения и оборудование для механического обезвоживания осадка с последующим компостированием, что обеспечивает снижение объемов осадка и возможность его дальнейшей утилизации.

При технической возможности в качестве направления модернизации целесообразно рассматривать объединение систем водоотведения территориально близких населенных пунктов с организацией единых очистных сооружений. Формирование укрупненной системы позволяет обеспечить более стабильный приток сточных вод, приблизить фактические гидравлические нагрузки к оптимальным значениям и создать условия для надежной работы очистных сооружений. Неиспользуемые карты полей фильтрации очистных сооружений, выводимых из эксплуатации, целесообразно рекультивировать с последующим возвратом в сельскохозяйственный оборот. Это позволит снизить экологические риски, связанные с заилением и деградацией почв, и обеспечит рациональное использование территорий.

Рекомендуемым направлением модернизации сетей водоотведения является поэтапная перекладка изношенных трубопроводов с заменой устаревших материалов на современные трубы из полиэтилена и поливинилхлорида. Данные материалы обладают высокой коррозионной стойкостью, устойчивостью к агрессивным средам и низкой шероховатостью внутренней поверхности, что снижает вероятность заиливания и образования отложений, а также характеризуются длительным сроком службы. Применение полимерных труб позволяет обеспечить более стабильные гидравлические режимы работы сети и сократить эксплуатационные затраты в течение всего периода эксплуатации.

Отсутствие в Гомельском районе действующей вакуумной системы водоотведения, большие капитальные затраты на строительство и сложность эксплуатации исключают целесообразность внедрения данных систем на территории района. В условиях Гомельской области рациональным направлением развития водоотведения является использование и поэтапная модернизация существующих самотечных и напорных систем канализации. Применение данных систем обеспечивает технологическую надежность, соответствие существующей схеме водоотведения и снижение эксплуатационных рисков при обеспечении устойчивого отведения и очистки сточных вод.

Применение самотечных систем водоотведения рекомендуется при наличии условий рельефа, обеспечивающих движение сточных вод самотеком при соблюдении нормативных уклонов трубопроводов.

Применение напорных систем водоотведения обосновано при невозможности обеспечения самотечного отведения сточных вод: при наличии плоского рельефа местности, пересечении естественных и искусственных препятствий, значительной глубине заложения трубопроводов, а также при необходимости транспортирования сточных вод на значительные расстояния или с подъемом по высоте.

Для населенных пунктов Глыбоцкое, Роги, Долголесье и Михальки разработаны рекомендации по модернизации систем водоотведения.

В н. п. Глыбоцкое отсутствие поблизости действующих очистных сооружений, техническая невозможность переподключения к сетям водоотведения других населенных пунктов, малая численность населения и отсутствие перспектив территориального развития исключают целесообразность строительства локальных очистных сооружений. Рекомендуемым направлением модернизации является устройство в нижней точке самотечной канализационной сети накопительной емкости для сточных вод с их последующим вывозом ассенизационной техникой на ближайшие действующие очистные сооружения.

Рекомендуемым направлением модернизации системы водоотведения деревни Роги является переподключение к действующим очистным сооружениям н. п. Азделино. Территориальная близость к областному центру и значительная численность населения обосновывают целесообразность централизованного отведения сточных вод. Реализация данного решения предусматривает строительство канализационной насосной станции и напорного коллектора.

Рекомендуемым направлением модернизации для н. п. Долголесье и Михальки является объединение существующих систем водоотведения, что обеспечит снижение капитальных и эксплуатационных затрат. Близкое территориальное расположение населенных пунктов обосновывает целесообразность реализации единой схемы канализования. Полное разрушение ранее эксплуатируемых очистных сооружений вблизи н. п. Долголесье исключает возможность их восстановления до первоначального состояния, поэтому механическую очистку сточных вод следует предусматривать с использованием компактной установки. Территорию существующих карт полей фильтрации необходимо восстановить путем удаления древесно-кустарниковой растительности, проведения работ по вспашке для улучшения фильтрующих свойств грунта и восстановления обваловки карт. В данных населенных пунктах требуется выполнение работ по реконструкции канализационных насосных станций и напорных коллекторов с последующим объединением сетей в единую технологическую схему.

Разработанный комплекс технически и экономически обоснованных рекомендаций позволяет эффективно модернизировать системы водоотведения малых населенных пунктов с учетом их демографической, технической и территориальной специфики. Внедрение предложенного дифференцированного подхода, включающего установку компактных очистных сооружений и перекладку изношенных трубопроводов современными полимерными материалами, обеспечит высокую технологическую надежность отведения и очистки сточных вод. Реализация разработанных мероприятий позволит оптимизировать капитальные и эксплуатационные затраты, а также гарантированно улучшить санитарно-экологическую обстановку на рассматриваемых территориях.

Список литературы

1 **Ануфриев, В. Н**. Рекомендации по организации водоотведения в сельской местности / В. Н. Ануфриев. – Минск : Позитив-центр, 2014. – 60 с.

2 **Новикова, О. К.** Системы канализации малых населенных пунктов: текущая ситуация и проблемные аспекты / О. К. Новикова, А. Б. Невзорова // Труды БГТУ. Сер. 2: Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2020. – № 2 (235). – С. 183–188.

УДК 691.32:666.97.035

АНАЛИЗ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ УСКОРЕННОГО ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА

А. В. ПАТРИКЕЕВА, А. Г. ТАШКИНОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Производство бетонных и железобетонных изделий относится к числу наиболее энергоёмких отраслей строительной индустрии. Тепловая обработка (ТО) бетона, обеспечивающая ускоренное твердение и достижение распалубочной прочности в сжатые сроки, потребляет значительную долю тепловой энергии на заводах железобетонных изделий. Удельный расход теплоносителя на производство 1 м³ железобетонных изделий (ЖБИ) в 80-х годах XX века составлял в среднем 2000 МДж/м³, в 90-х – 1250–1460 МДж/м³, а в настоящее время – 920–1130 МДж/м³, что в 2–3 раза превышает показатели технически развитых стран. При этом КПД использования теплоносителя в существующих установках остаётся низким – на уровне 12–18 %, а непроизводительные затраты тепловой энергии достигают 40–70 %.

Актуальность повышения эффективности тепловых установок обусловлена не только экономическими факторами, но и необходимостью снижения углеродного следа строительной отрасли. В настоящей работе систематизированы основные направления совершенствования тепловых установок для ускоренного твердения бетона – от модернизации традиционных методов до внедрения инновационных технологий нагрева.

Тепловые установки для ускоренного твердения бетона классифицируются по нескольким признакам. По способу передачи теплоты выделяют установки контактного, конвективного и радиационного нагрева. По режиму работы – установки периодического и непрерывного действия. На большинстве заводов ЖБИ применяются установки периодического действия с контактным способом передачи теплоты: пропарочные камеры, тупиковые и проходные туннельные камеры.

Основным теплоносителем в традиционных установках служит водяной пар, подаваемый от местных отопительно-производственных котельных. Однако паропрогрев характеризуется значительными потерями теплоты через ограждающие конструкции камер и тепловые сети. Альтернативными методами являются электропрогрев, индукционный нагрев, инфракрасный обогрев, термосное выдерживание, а также комбинированные методы.

Одним из наиболее результативных направлений повышения эффективности тепловых установок является предварительный разогрев бетонной смеси. Исследования показывают, что оптимальными параметрами процесса получения «тёплого» бетона являются температура бетонной смеси 35–45 °С и температура термосного выдерживания изделий 65–70 °С при продолжительности 4–4,5 часа. В этих условиях необходимая распалубочная прочность достигается в сжатые сроки. Предварительный разогрев компонентов бетонной смеси до оптимальной температуры позволяет по сравнению с традиционным пропариванием изделий уменьшить длительность тепловой обработки в два раза, повысить оборачиваемость форм и тепловых установок, увеличить съём продукции с 1 м² производственной площади без дополнительных капитальных затрат.

Существенный резерв повышения эффективности связан с применением химических добавок-ускорителей твердения. Введение комплексных добавок на основе шлама металлоперерабатывающих предприятий в количестве 2 % от расхода цемента позволяет не только устранить недобор прочности пропаренного бетона в возрасте 28 суток, но и обеспечить получение более высоких показателей прочности. Добавка наиболее эффективна при пониженных температурах изотермического прогрева и для бетонов с низкими расходами цемента, что даёт возможность снизить температуру тепловой обработки или сократить её продолжительность.

Совершенствование конструкции тепловых установок предполагает прежде всего снижение теплопотерь через ограждающие конструкции. Анализ статей теплового баланса показывает, что малоэффективные затраты тепловой энергии составляют около 40–70 %, причём значительная их часть приходится на потери через стенки, днище и крышку камер. Для уменьшения расхода теплоты при паровой обработке бетона необходимо увеличение толщины стен и коэффициента заполнения камер.

Режимные параметры тепловой обработки оказывают определяющее влияние на энергоэффективность. Классический изотермический режим, предполагающий длительную выдержку при постоянной температуре с контролируемым подводом теплоты, оказывается более энергозатратным (57,1 МДж) по сравнению с энергосберегающим режимом (около 55,7 МДж). Энергосберегающий режим предполагает нагрев бетона до определённой температуры за относительно короткий период, после чего дальнейшее твердение осуществляется за счёт накопленной в тепловом агрегате теплоты и теплоты экзотермических реакций гидратации цемент

Многолетняя эксплуатация пароэжекционных систем, в которых отработавший теплоноситель удаляется из нижней части камеры и подаётся в верхнюю с добавлением свежего пара, показала возможность снижения удельного расхода пара на 15–35 % при обеспечении равномерного прогрева изделий по всему объёму камеры и сокращении времени термообработки на 2–4 часа.

Индукционный нагрев бетона представляет собой перспективную технологию, основанную на принципе электромагнитной индукции. Экспериментальные исследования показали, что индукционный нагрев при комнатной температуре обеспечивает на 11,39 % более высокую прочность и на 41,86 % меньшее энергопотребление по сравнению с индукционным нагревом при низких температурах, а также на 3,51% более высокую прочность и на 30,56 % меньшее энергопотребление по сравнению с паропрогревом. Энергетическая эффективность индукционного нагрева достигает 80 % и более, поскольку теплота генерируется непосредственно внутри материала, минимизируя потери на теплопроводность.

Микроволновый нагрев обеспечивает объёмный и быстрый нагрев бетона за счёт возбуждения молекул воды электромагнитным полем. По сравнению с паропрогревом микроволновый нагрев создаёт значительно меньшие температурные градиенты при одинаковых скоростях объёмного нагрева. Использование быстрых циклов твердения продолжительностью менее шести часов позволяет достичь прочности на сжатие свыше 25 МПа в высококачественном сборном бетоне. Оптимальный режим микроволнового нагрева включает предварительный прогрев в течение 30 минут, периодическое воздействие микроволновой энергией по 15 минут с паузами продолжительностью 60 минут.

Электродный прогрев остаётся одним из распространённых методов, однако его эффективность может быть повышена путём модифицирования бетонной смеси токопроводящими минералами, например, молотым шунгитом. Это способствует снижению электрического сопротивления бетона, увеличению температуры в первые сутки прогрева и повышению темпов набора прочности. Расход электроэнергии при электродном прогреве ориентировочно составляет 0,6 кВт·ч на каждый градус разогрева 1 м³ бетона.

Современным инструментом повышения эффективности тепловых установок является численное моделирование нестационарных процессов тепломассопереноса. Разработанная математическая модель позволяет определять момент достижения заданной температуры для любой точки внутреннего пространства изделия, что может использоваться при проектировании новых и модернизации существующих теплотехнологических установок ускоренной гидратации бетона, а также в системах автоматизированного управления процессом твердения.

Применение эксергетического анализа позволяет количественно оценивать энергоэффективность режимов работы теплотехнологического оборудования. Установлено, что для общестроительного бетона марки В15 эксергия смеси перед стадией формовки составляет 1024 кДж/кг, при этом эксергетическая эффективность режима тепловой обработки может быть существенно повышена за счёт оптимизации температурно-временных параметров.

В заключение можно сказать, что анализ путей повышения эффективности тепловых установок для ускоренного твердения бетона позволяет выделить несколько взаимодополняющих направлений. Технологические решения, включающие предварительный разогрев смеси и применение добавок-ускорителей, обеспечивают сокращение продолжительности ТО в два раза без дополнительных капитальных затрат.

Конструктивная модернизация установок и оптимизация режимов тепловой обработки позволяют снизить непроизводительные потери теплоты с 40–70 % до существенно более низких значений. Инновационные методы нагрева – индукционный, микроволновый, электродный с модифицированием смеси – демонстрируют значительное преимущество по энергопотреблению и качеству готовой продукции по сравнению с традиционным паропрогревом.

Комплексное применение рассмотренных подходов с использованием математического моделирования и систем автоматизированного управления создаёт предпосылки для достижения показателей энергоэффективности, сопоставимых с уровнем технически развитых стран. Приоритетными направлениями дальнейших исследований следует считать разработку гибридных методов нагрева, оптимизацию режимов ТО на основе эксергетических критериев и внедрение интеллектуальных систем управления тепловыми установками.

Список литературы

1 **Ташкинов, А. Г.** Тепловые установки для ускоренного твердения бетонных изделий : учеб.-метод. пособие / А. Г. Ташкинов.– Гомель : БелГУТ, 2013. – С. 4–34.

2 **Батяновский, Э. И.** Технология производства железобетонных изделий : учеб. пособие / Э. И. Батяновский. – Минск : Выш. шк., 2019. – С. 319.

3 **Ташкинов, А. Г.** Оптимизация расходов тепловой энергии при производстве сборных бетонных и железобетонных изделий / А. Г. Ташкинов. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 64–65.

УДК 72.03(510)

АРХИТЕКТУРА КИТАЯ. ИСТОКИ. СОВРЕМЕННОСТЬ

П. А. ПЕТРОВЕЦ, И. А. КАЛУГИН, В. М. ПРАСОЛ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Китайская архитектура выработала устойчивый язык: деревянный каркас, модульность, осевая симметрия, ансамбль, связь с ландшафтом. Древнейший пример – Лянчжу (3300–2300 гг. до н. э.): деревянные балки высотой до 17 м с соединительными отверстиями. Конфуцианство давало осевую симметрию и иерархию (Запретный город), даосизм – асимметрию, пустоту, сады (Сучжоу). Космология воплощена в Храме Неба: круг и квадрат, число 9 [1, 2, 4]. Стандартом городской плани-

ровки является Дасин/Чанъань (582 г., Лю Лонг, Ювэнь Кай): регулярная планировка, ось север – юг, кварталы [2]. Конструкция: колонны на фундаменте, балки, дюбели, легкие стены без несущей функции; отсюда и сейсмостойкость. Шаньсийская пагода (60 м, 900 лет) пережила землетрясения. Принцип ансамбля: Запретный город (1000 комнат, 720 тыс. м^2) построен за 13 лет. Жилые помещения – сыхэюань, подземный дикэнъюань, изогнутые крыши, глазурованная черепица, декор. Регионы: тибетские дзонги, глинобитные мечети Синьцзяна, своды Юньнани, юрты Монголии, висячий храм Сюанькунси, пещеры Юньгана XIX–XX вв. – разрыв с традицией. В концессиях строятся европейские стили. После 1912 г. – поиск синтеза. Лян Сычэн изучает наследие. Мавзолей Сунь Ятсена (1926–1929, Лу Яньчжи): западная ось и конструкция, китайская кровля [2]. После 1978 г. – строительный бум, бетон, сталь, стекло. Отель «Сяншань» И. М. Пея (1982): стальной каркас, атриум, планировка сыхэюаня, местная палитра. 1999 г. Пекинская хартия У Ляньюна: регионализация современной архитектуры. 2000-е – «звёздная» архитектура: «Яйцо» Поля Андре, «Птичье гнездо» Herzog & de Meuron, CCTV Рема Колхаса. Возник термин «странные здания». К 2013–2014 гг. – поворот к контексту и идентичности [3, 5].

Лян Сычэн восстановил предание о традиции, расшифровал «Инцзао фаши» и доугун. Хэ Цзинтан: «два подхода и три качества» – целостность, устойчивое развитие, региональность, культурность, современность. Павильон Китая на Экспо-2010 – абстрактный красный «Восточный венец». Йо Мин Пей: Музей Сучжоу (2006) – белые стены, серая черепица, дворы, вода, каменная композиция как живопись. Ван Шу (Притцкер, 2012): музей в Нинбо из переработанного кирпича, кампус в Ханчжоу, глинобит 9000 м². Лю Цзякунь (Притцкер, 2025): «низкотехнологичная стратегия», West Village в Чэнду – гигантский сыхэюань, «кирпичи возрождения» после Вэньчуаня. Чжан Пэнцзюй: «естественная архитектура» Внутренней Монголии. Ма Янсун (MAD): Shanshui City, Оперный театр в Харбине (79 тыс. м², текучие формы), Chaoyang Park Plaza, библиотека в Хайкоу (бетон, ЧПУ, 3D-печать), стадион в Цюйчжоу с земляным покровом [6]. Типология сооружений. Китайское зодчество выработало устоявшиеся типы: дворцы (гун), храмы (мяо), пагоды (та), алтари (тань), гробницы (лин), мосты (цяо), павильоны (тин), беседки (гэ), галереи. Пагоды прошли путь от индийских ступ к многоярусным башням – деревянным [4], кирпичным, каменным, даже железным. Мосты различались по конструкции: арочные, балочные, висячие, с «лунными» пролётами. Сады делились на «городские» (Сучжоу) и «императорские» (Ихэюань). Жилища – сыхэюань (Пекин), тулоу (Фуцзянь, круглые глинобитные крепости), яодун (пещерные дома в лёссе), свайные постройки (Юньнань) [1, 3, 4].

Конструктивные системы. Основание представляло собой деревянный каркас без гвоздей с колючими соединениями. Доугун – многоярусные кронштейны – распределял нагрузку и одновременно служил социальным маркером: количество и сложность кронштейнов регламентировали статус здания. Модуль «ин» (высота колонны) передавал пропорции. Крыши были односкатные, двускатные, вальмовые, шатровые, с характерными изогнутыми скатами. Черепица глазурованная (желтая – императорская), керамическая, соломенная. Стены кирпичные, глинобитные, камышовые или деревянные стены несли не нагрузку, а функцию ограждения [1, 5].

Современные интерпретации. Ван Шу использует в музее Нинбо «второстепенные здания» – кирпич и камень из разрушенных зданий – при проведении памятного палимпсеста. В кампусе Ханчжоу он возводит глинобитные стены площадью 9000 метров квадратных, укрепленные бамбуком «West village». Цзякунь Лю строит «вертикальный сыхэюань» с бамбуковыми рощами и общественными пространствами, а его «кирпичи возрождения» сделаны из разрушенного вэньчуаньского щебня [6]. Ма Янсун в Харбинском оперном театре использует белый бетон и стекло, создает «снежный» ландшафт. Чжан Пэнцзюй адаптирует юрты и буддийские монастыри Внутренней Монголии к современным функциям. Принципы пассивного энергодизайна – ориентация, естественная вентиляция, защита от солнца, сбор дождевой воды – веками разрабатывались в китайском жилье и сегодня внедряются в энергоэффективные и научно-инновационные комплексы [2, 5].

Философские коды. Инь – ян проявляется в оппозициях верх – низ, свет – тень, открытое – закрытое. Конфуцианство даёт ось, иерархию, ритуал. Даосизм – пустоту, естественность, асимметрию. Нумерология – числа 3, 5, 9, 108. Фэншуй – ориентацию, водоёмы, расположение входов. Всё это трансформировалось в современные концепции: «дух места», устойчивость, пассивный дизайн, связь с ландшафтом [1–3].

Сегодня китайская архитектура движется от подражания к оригинальности, от стандартизации к разнообразию, от контраста с природой к гармонии. Что общего у мастеров, так это отказ от прямых цитат, работа с материалами и памятью, адаптация к окружающей среде и диалог с потенциальными клиентами. Будущее – это не единый стиль, а плюрализм в общем культурном коде. Две Притцкеровские премии за 13 лет подтвердили признание. Суть в том, что архитектура говорит через пространство, структуру и окружающую среду, а не через ярлыки идентичности. Это новая китайская архитектура [6].

Список литературы

1 **Лян Сычэн.** История архитектуры Китая / Сычэн Лян ; пер. М. Ю. Шевченко. – М. : Шанс, 2025. – 656 с.

2 **Шевченко, М. Ю.** История архитектуры и градостроительства Китая / М. Ю. Шевченко. – М. : Архитектура-С, 2019. – 480 с.

3 **Денике, Б. П.** Архитектура Китая / Б. П. Денике. – М. : Юрайт, 2025. – 122 с. – (Антология мысли).

4 **Лоу Цинси**. Традиционная архитектура Китая / Лоу Цинси ; пер. Чжэн Яохуа. – Пекин : Межконтинентальное издательство Китая, 2002. – 175 с. – (Основные сведения о Китае).

5 **Кулагин, А. А**. Очерки по истории архитектуры и строительного дела Китая / А. А. Кулагин. – М. : [б. и.], 2022.

УДК 628.144:532.542

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЧНОСТНЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ КАК ОСНОВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

А. М. РАТНИКОВА, И. А. САЛЯНКО

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Сети водоснабжения являются важным элементом городской инфраструктуры, обеспечивающим подачу питьевой воды от станций водоподготовки до потребителей. Протяженность распределительных сетей в крупных городах достигает тысяч километров, а их строительство и эксплуатация сопряжены со значительными материальными и энергетическими затратами. В условиях ужесточения экологических требований и перехода к принципам устойчивого развития выбор материала и геометрических параметров трубопроводов приобретает не только технико-экономическое, но и выраженное экологическое значение. При проектировании наружного водопровода из полиэтиленовых труб необходимо выбрать такие значения номинального наружного диаметра d_n и стандартного размерного коэффициента *SDR*, численно равного отношению номинального наружного диаметра трубы к номинальной толщине стенки, которые удовлетворяют одновременно нескольким группам требований:

– прочностные – максимальное рабочее давление в трубопроводе с учётом гидравлических ударов не должно превышать номинального давления (*PN*) для выбранного *SDR*;

– гидравлические – скорость потока при расчётном расходе должна находиться в рекомендуемом диапазоне (обычно 0,8–2,5 м/с), а удельные потери напора – не превышать экономически обоснованного уровня;

– экономические – суммарные приведённые затраты, включающие стоимость труб, строительно-монтажных работ и эксплуатационные энергозатраты на подачу воды за весь срок службы, должны быть минимальными.

Внутренний диаметр трубы определяется как разность наружного диаметра и удвоенной толщины стенки: $d_{вн} = d_n - 2e_n$. Даже незначительное изменение толщины стенки (e_n) существенно влияет на гидравлические характеристики. Пропускная площадь пропорциональна квадрату внутреннего диаметра, а потери давления при прочих равных условиях приблизительно пропорциональны $1d^{5}_{вн}$. Это означает, что уменьшение внутреннего диаметра всего на 1 % способно увеличить расчётные потери давления примерно на 5 %. Гидравлический расчет трубопроводов водопроводных сетей выполняется в соответствии с приложением А СП 4.01.04-2023 [1]. Коэффициент гидравлического сопротивления для труб определяется с учетом их гидравлической гладкости. Таким образом, выбор более толстостенной трубы (с меньшим *SDR*) при том же наружном диаметре приводит к заметному росту гидравлических потерь и, как следствие, к увеличению энергозатрат на перекачку.

В таблице 1 представлены гидравлические параметры труб ПЭ100 d_n = 160 мм при расчётном расходе Q = 30 л/с (108 м³/ч).

Таблица 1 – **Гидравлические параметры труб ПЭ100 d_n = 160 мм при различных *SDR***

Параметр	*SDR* 11	*SDR* 13,6	*SDR* 17	*SDR* 21
Толщина стенки e_n, мм	14,6	11,8	9,5	7,7
Внутренний диаметр $d_{вн}$, мм	130,8	136,4	141,0	144,6
Площадь сечения, см²	134,3	146,1	156,1	164,2
Скорость потока v, м/с	2,23	2,05	1,92	1,83
Удельные потери 1000i, мм/м	46,6	28,0	18,5	13,2

Из таблицы 1 видно, что переход от *SDR* 11 к *SDR* 21 (уменьшение толщины стенки с 14,6 до 7,7 мм) увеличивает внутренний диаметр на 10,6 % и снижает удельные потери напора более чем в 3,5 раза. При этом скорость потока уменьшается с 2,23 до 1,83 м/с, что остаётся в допустимых пределах. Обратная ситуация наблюдается при выборе более прочной трубы: переход от *SDR* 17 к *SDR* 11 при том же наружном диаметре приводит к росту потерь напора в 2,5 раза, что требует либо увеличения мощности насосного оборудования, либо перехода на больший номинальный диаметр.

Результаты выполненных расчётов позволяют выработать комплексный подход к выбору труб для наружных сетей водоснабжения:

1) сбор исходных данных: расчетный максимальный расход транспортируемой воды; рабочее давление в сети; протяженность участка и расчетная температура воды;

2) предварительное определение геометрических параметров: ориентировочного внутреннего диаметра трубопровода, на основании экономически выгодных скоростей движения воды; стандартного номинального наружного диаметра; выбор *SDR* из условия обеспечения нормативного запаса прочности при постоянном рабочем давлении [2];

3) определение внутренних геометрических характеристик с учетом толщины стенки, соответствующей выбранному размерному отношению (*SDR*), реальных скоростей, потерь напора и величины гидравлического удара;

4) расчет накопленного усталостного повреждения. Для каждого режима эксплуатации определяется предельный срок службы трубы при непрерывном воздействии соответствующего давления по нормативным кривым длительной прочности материала [2, 3]. На основе полученного значения рассчитывается полный прогнозируемый срок службы трубопровода;

5) проверка критериев долговечности и корректировка параметров. Проверяется условие, согласно которому годовой износ не должен превышать допустимого порога, обеспечивающего нормативный 50-летний срок эксплуатации. Если нормативный срок службы не достигается из-за высокой интенсивности накопления усталостных повреждений при гидроударах, производится перерасчет с переходом на меньшее размерное отношение (*SDR*), т. е. увеличивается толщина стенки. Если утолщение стенки ведет к чрезмерному уменьшению внутреннего просвета и недопустимому росту гидравлических потерь и скоростей потока, увеличивается номинальный наружный диаметр на один типоразмер, после чего гидравлический расчет повторяется;

6) технико-экономическое сравнение и принятие оптимального решения. Окончательный выбор сортамента (диаметра и *SDR*) осуществляется путем сравнения суммарных приведенных затрат. Эти затраты объединяют первоначальные капитальные вложения на закупку и прокладку труб с эксплуатационными затратами на электроэнергию, расходуемую насосными станциями на преодоление гидравлического сопротивления за весь расчетный период эксплуатации.

Сочетание энергетического подхода (оценка по правилу Майнера) с гидравлическим расчетом позволяет научно обосновать рациональное стандартное размерное отношение полиэтиленовых труб. Прочностной запас должен строго соответствовать фактическому напорному режиму. Избыточная толщина стенки, не подкрепленная расчетом, приводит к необоснованному росту капитальных и, что особенно важно, энергетических затрат на протяжении всего жизненного цикла сети.

Список литературы

1 СП 4.01.04-2023, BY. Водопроводные сети и сооружения = Вадаправодныя сеткі і збудаванні : строительные правила Республики Беларусь : утв. М-вом архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь 17.03.2023 : введ. 25.05.2023. – Минск : Минстройархитектуры, 2023. – III, 56 с.

2 ГОСТ ISO 13760-2024. Трубы из пластмасс для транспортирования жидкостей под давлением. Правило Майнера. Метод расчета накопленного повреждения. – Введ. 29.11.2024 / Подготовлен Обществом с ограниченной ответственностью «Группа ПОЛИПЛАСТИК» (ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК»). – Минск : Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2024. – III, 8 с.

3 ГОСТ 32415-2013. Трубы напорные из термопластов и соединительные детали к ним для систем водоснабжения и отопления. Общие технические условия = Трубы напорныя з тэрмапластаў і злучальныя дэталі да іх для сістэм водазабеспячэння і ацяплення. Агульныя тэхнічныя ўмовы. – Введ. РБ 01.03.2016. – Минск : Госстандарт, 2016. – IV, 73 с.

УДК 691.32:624.012.45/.46

АНАЛИЗ КАПИЛЛЯРНОЙ ПОРИСТОСТИ БЕТОНА КЛАССА ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ $С^{20}/_{25}$ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

В. Ю. СВЕРЖ, Е. В. МЕДВЕДЕВА, К. Э. АГЕЕВА, А. А. ВАСИЛЬЕВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

На основании результатов аналитического исследования зависимости капиллярной пористости бетона от расчетного содержания цемента и отпускной прочности бетона (выведенной проф. В. В. Бабицким для бетона класса по прочности на сжатие $С^{20}/_{25}$) (для подвижных и жестких смесей) в [1] были получены выражения $П_к = f(Ц, R)$:

– для подвижных смесей

$$П_к = (-0{,}003R + 0{,}0492)Ц + (-5 \cdot 10^{-15} R + 6 \cdot 10^{-13}); \quad (1)$$

– жестких смесей

$$П_к = (-0{,}004R + 0{,}0515)Ц + (5 \cdot 10^{-15} R - 8 \cdot 10^{-13} R + 3 \cdot 10^{-11}), \quad (2)$$

где $П_к$ – капиллярная пористость бетона, %; R – отпускная прочность бетона, %; Ц – содержание цемента, кг/м^3.

В графическом виде зависимость $П_к = f(Ц, R)$ для подвижных и жестких смесей для бетона класса по прочности на сжатие $С^{20}/_{25}$ представлена на рисунке 1.

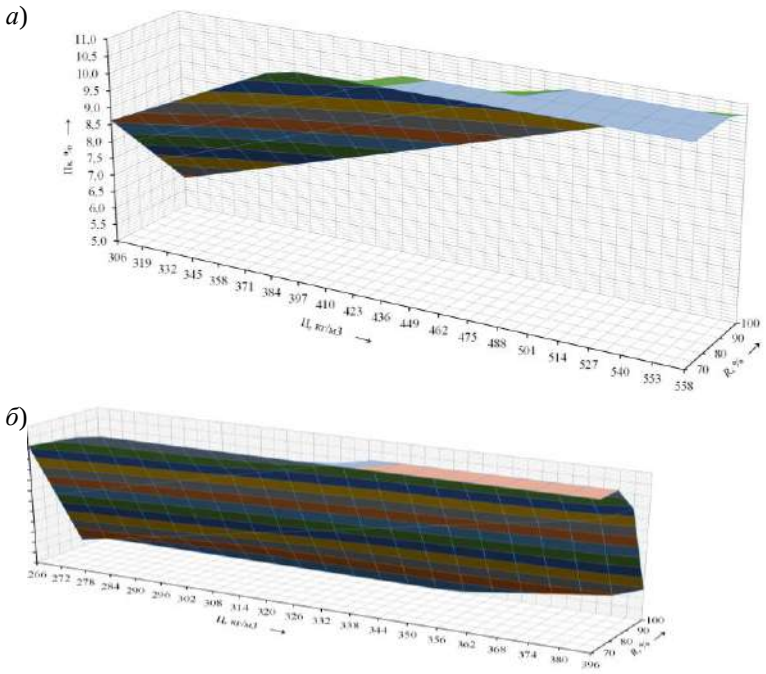


Рисунок 1 – Зависимость $П_к = f(R)$, бетона класса по прочности на сжатие $С^{20}/_{25}$:
а – для подвижных смесей (П1–П5); *б* – для жестких смесей (Ж1–Ж4)

Полученные зависимости $П_к = f(Ц_р, R)$ позволяют выполнить анализ изменения капиллярной пористости бетона класса по прочности $С^{20}/_{25}$ от параметров бетонной смеси (В/Ц, α).

При изготовлении бетона класса по прочности на сжатие $С^{20}/_{25}$, для любого значения отпускной прочности бетона для подвижных смесей используется 25 значений Ц (ОК = 1…25 см), а для жестких – 36 (5–40 с). Для реальных бетонных и железобетонных элементов используется только малая часть значений $Ц_р$ и отдельные значения *R*. Для анализа используем граничные значения *R* = 70, 80, 90 и 100 % и $Ц_р$ для подвижных смесей (П1, ОК = 4 см), для жестких (Ж1 – 8 с и Ж2 – 15 с) [2].

Исходные данные для анализа представлены в таблице 1. Путем математической обработки данных таблицы 1 (с применением табличного процессора Excel) получим зависимости $П_к = f(R)$, $П_к = f(Ц_р)$, $П_к = f(В/Ц)$ и $П_к = f(\alpha)$ для подвижных и жестких смесей.

Таблица 1 – **Исходные данные для анализа $П_к$ бетона класса по прочности на сжатие $С^{20}/_{25}$**

R, %	$Ц_р$, кг/м^3			В/Ц	α, %	$П_к$, %		
	П1	Ж1	Ж2			П1	Ж1	Ж2
70	334	304	293	0,546	0,7167	9,419	7,144	6,886
80	364	329	317	0,503	0,7087	9,173	6,416	6,182
90	397	355	341	0,466	0,7019	8,813	5,503	5,286
100	432	386	369	0,434	0,6904	8,294	4,439	4,244

Таблица 2 – **Зависимости $П_к = f(R)$, $П_к = f(Ц_р)$, $П_к = f(В/Ц)$ и $П_к = f(\alpha)$ для бетона класса по прочности на сжатие $С^{20}/_{25}$**

Зависимости $П_к = f(R)$, $П_к = f(Ц_р)$, $П_к = f(В/Ц)$ и $П_к = f(\alpha)$ для смесей марок по удобоукладываемости		
П1	Ж1	Ж2
$П_к = (-0{,}0373\,R + 12{,}10)$, $R^2 = 0{,}9738$	$П_к = (-0{,}0903\,R + 13{,}55)$, $R^2 = 0{,}9931$	$П_к = (-0{,}0882\,R + 13{,}15)$, $R^2 = 0{,}9927$
$П_к = (-0{,}0115\,Ц_р + 13{,}30)$, $R^2 = 0{,}9835$	$П_к = (-0{,}0332\,Ц_р + 17{,}29)$, $R^2 = 0{,}9985$	$П_к = (-0{,}0351\,Ц_р + 17{,}22)$, $R^2 = 0{,}9971$
$П_к = \left(9{,}856\frac{В}{Ц} + 4{,}122\right)$, $R^2 = 0{,}9488$	$П_к = \left(23{,}97\frac{В}{Ц} - 5{,}803\right)$, $R^2 = 0{,}9780$	$П_к = \left(23{,}42\frac{В}{Ц} - 5{,}750\right)$, $R^2 = 0{,}9772$
$П_к = (43{,}69\alpha - 21{,}85)$, $R^2 = 0{,}9921$	$П_к = (104{,}8\alpha - 67{,}94)$, $R^2 = 0{,}9949$	$П_к = (104{,}8\alpha - 66{,}49)$, $R^2 = 0{,}9948$

Полученные зависимости $П_к = f(R)$, $П_к = f(Ц_р)$, $П_к = f(В/Ц)$ и $П_к = f(\alpha)$ для подвижных и жестких смесей позволяют прогнозировать капиллярную пористость бетона класса по прочности на сжатие $С^{20}/_{25}$ от различных параметров бетонной смеси. Выполненный анализ позволяет получить аналогичные зависимости для бетона любого класса по прочности на сжатие, кроме того по результатам полученных зависимостей – получить аналогичные зависимости для любой совокупности бетонов, а также зависимость капиллярной пористости бетона от гарантированной прочности бетона.

Список литературы

1 Анализ определения капиллярной пористости бетона класса по прочности на сжатие $С^{20}/_{25}$ / А. А. Васильев, К. Э. Агеева, В. В. Логвин, Н. В. Бандюк // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2026. – № 1 (52). – С. 37–39.

2 **Васильев, А. А.** Прогнозирование фактической карбонизации с учетом технологических параметров бетона : монография / А. А. Васильев, А. М. Нияковский. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 206 с.

УДК 693.55:691.328

АНАЛИЗ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА С КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРОЙ

Д. А. СВЕТЛИЦКИЙ, Н. В. ЧЕРНЮК
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Применение композитных материалов в строительстве активно развивается благодаря их малому весу, высокой коррозионной стойкости, долговечности и отсутствию магнитных свойств. Особенно перспективна композитная арматура (стеклопластиковая, базальтовая, углеродная), используемая в конструкциях, подверженных коррозионным воздействиям: в морском и химическом оборудовании, мостовых сооружениях, фасадных системах [1]. Однако ключевым ограничением оста-

ётся поведение таких материалов при длительном нагружении, прежде всего ползучесть самой арматуры. Именно на длительных сроках эксплуатации возникает риск неограниченно растущих деформаций, способных привести к потере эксплуатационных характеристик конструкции раньше, чем в случае со стальным армированием.

Ползучесть – это нарастание деформаций материала под постоянной нагрузкой во времени, обусловленное реологическими свойствами, релаксацией напряжений и микроструктурными изменениями. Для бетона ползучесть связана с перераспределением влаги и микроползучестью цементного камня, которая со временем затухает. Для композитной арматуры она обусловлена вязкоупругостью полимерной матрицы и может не затухать, что приводит к постоянному росту деформаций конструкции [2, 3].

Композитная арматура (FRP – fiber-reinforced polymer) обладает низким модулем упругости (40–55 ГПа у стеклопластика по сравнению 200 ГПа у стали), высокой химической стойкостью и отсутствием магнитных свойств [4]. Из-за низкого модуля упругости и вязкоупругости матрицы такая арматура сама подвержена ползучести: даже если бетон растянутой зоны с трещинами практически не деформируется, деформации конструкции продолжают расти. При кратковременных испытаниях композит показывает хорошие результаты, тогда как длительное нагружение остаётся основным источником риска [5].

Обобщённое суждение о ползучести композитного армирования без учёта типа волокна некорректно: под общим наименованием FRP объединены материалы, различающиеся по деформативности в несколько раз. Стеклопластиковая арматура (GFRP) имеет модуль упругости 40–60 ГПа при прочности на растяжение 700–1200 МПа; базальтопластиковая (BFRP) близка к ней по деформативности (50–70 ГПа); углепластиковая (CFRP) характеризуется модулем 120–180 ГПа, приближаясь к стальной, а арамидная (AFRP) занимает промежуточное положение [4, 6]. Столь широкий диапазон отражается на кривизне и прогибах изгибаемых элементов уже при кратковременном нагружении, а при длительном к нему добавляется неодинаковая склонность волокон к вязкоупругому деформированию.

Углеродное волокно практически не ползёт, и прирост деформаций CFRP-стержня определяется почти исключительно поведением полимерной матрицы; стеклянное и, в меньшей степени, базальтовое волокно проявляют собственную чувствительность к длительному действию нагрузки, накладывающуюся на деформирование связующего. Существенное значение имеют также объёмная доля волокон (обычно 60–75 %), тип связующего (эпоксидное, винилэфирное, полиэфирное) и качество пропитки: при прочих равных условиях стержни на эпоксидном связующем с высокой температурой стеклования показывают меньший прирост деформаций во времени [7].

Длительное нагружение опасно для композитной арматуры не только ростом деформаций. Второе, не менее важное явление – длительный разрыв (creep rupture): разрушение стержня после некоторого времени выдержки при напряжении, существенно меньшем кратковременной прочности. Зависимость разрушающего напряжения от логарифма времени до разрушения близка к линейной, что позволяет экстраполировать результаты сравнительно коротких испытаний на проектные сроки службы. Такая экстраполяция на 50–100 лет даёт для стеклопластика 0,3–0,5, для арамида 0,5–0,6 и для углепластика 0,8–0,9 от кратковременной прочности [7, 8].

Существенное влияние на длительное деформирование композитной арматуры оказывают внешние условия, причём в значительно большей степени, чем в случае стали. Определяющим фактором является температура: по мере приближения к температуре стеклования связующего (60–120 °C для эпоксидных и винилэфирных матриц) подвижность полимерных цепей резко возрастает, и скорость ползучести увеличивается на порядки. Это свойство используется и в положительном ключе – как основа ускоренных испытаний: согласно принципу температурно-временной аналогии, кривые ползучести, полученные при повышенных температурах, горизонтальным сдвигом по логарифмической шкале времени приводятся к единой обобщённой кривой, описывающей поведение материала при эксплуатационной температуре на протяжении десятилетий [9].

Повышенная влажность и щелочная среда порового раствора бетона (pH 12,5–13,5) вызывают пластификацию матрицы и постепенную деградацию границы «волокно – связующее», что для стеклянного волокна дополняется собственно щелочной коррозией [7]. Наконец, при уровне напряжений выше 0,5–0,6 длительной прочности ползучесть перестаёт быть линейной: скорость дефор-

мирования нарастает, стадия установившейся ползучести сменяется ускоренной и завершается длительным разрывом. Именно поэтому нормируется не абсолютное значение напряжения, а его доля от прочности.

Отдельного внимания требует совместная работа композитного стержня и бетона при длительном нагружении. Сцепление обеспечивается преимущественно механическим зацеплением за счёт песчаной обсыпки или навивки, а также адгезией связующего, причём сопротивление сдвигу определяется поверхностным слоем полимера, который сам обладает вязкоупругими свойствами. Следствием является ползучесть сцепления – постепенное увеличение взаимного смещения арматуры и бетона при неизменном усилии. Практически это проявляется в снижении во времени эффекта работы бетона между трещинами: жёсткость элемента на участках между трещинами падает, средние деформации растянутой зоны растут, ширина раскрытия трещин увеличивается даже при полностью постоянной нагрузке. Одновременно ползучесть бетона сжатой зоны смещает нейтральную ось и увеличивает кривизну сечения. В элементах со стальной арматурой оба процесса затухают вслед за затуханием ползучести бетона; при композитном армировании к ним добавляется незатухающее деформирование самого стержня и контактного слоя, чем и объясняется наблюдаемое расхождение кривых «прогиб – время» [7, 10].

Ползучести сопутствует обратное по постановке задачи явление – релаксация напряжений, т. е. их падение при неизменной деформации. Для элементов с преднапряжённой композитной арматурой именно релаксация определяет потери усилия во времени; они заметно выше, чем у стальной арматуры низкой релаксации, и существенно зависят от типа волокна: наименьшие значения характерны для углепластика, наибольшие – для арамидных и стеклопластиковых стержней [7, 11]. Одновременно на усилие в арматуре влияет усадка бетона: укорочение элемента снижает деформацию стержня, а вместе с ней и напряжение, однако из-за низкого модуля упругости композита абсолютная величина этой составляющей потерь оказывается меньше, чем при стальном армировании, – один из немногих случаев, когда низкий модуль работает в пользу конструкции. Совместный учёт ползучести бетона, ползучести и релаксации арматуры и усадки приводит к необходимости решать задачу для сечения во времени шаговым интегрированием по интервалам с пересчётом эффективного модуля бетона на каждом шаге.

Рациональной областью применения композитной арматуры остаются конструкции с умеренными длительными нагрузками при высоких требованиях к коррозионной стойкости: берегоукрепления, очистные сооружения, дорожные покрытия.

Список литературы

1 **Литвинов, В. М.** Стеклопластиковая арматура в строительстве / В. М. Литвинов // Строительство и архитектура. – 2019. – № 4. – С. 56–62.

2 ГОСТ 32492-2024. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения деформаций ползучести. – Введ. 01.06.2025 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL:https://docs.cntd.ru/document/1310904401 (дата обращения: 05.09.2026).

3 **Nevado, L.** Long-term deformation of concrete: theory and experiments / L. Nevado, Z. P. Bažant // Cement and Concrete Research. – 2014. – Vol. 58. – P. 25–36.

4 **Козлов, В. С.** Композитные материалы в строительстве: свойства и применение / В. С. Козлов. – М. : Стройиздат, 2018. – 214 с.

5 **Hu, J.** Behavior of FRP reinforced concrete under long-term loading / J. Hu [et al.] // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 245. – P. 118445.

6 ГОСТ 31938-2022. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия. – Введ. 01.09.2022 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL:https://docs.cntd.ru/document/1200184527 (дата обращения: 05.09.2026).

7 ACI 440.1R-15. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars. – Farmington Hills : American Concrete Institute, 2015. – 88 p.

8 CSA S806-12. Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. – Mississauga : Canadian Standards Association, 2012. – 208 p.

9 **Findley, W. N.** Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials / W. N. Findley, J. S. Lai, K. Onaran. – Amsterdam : North-Holland Publishing, 1976. – 371 p.

10 **Bischoff, P. H.** Effective moment of inertia for calculating deflections of concrete members containing steel reinforcement and FRP reinforcement / P. H. Bischoff, A. Scanlon // ACI Structural Journal. – 2007. – Vol. 104, № 1. – P. 68–75.

11 Fib Bulletin 40. FRP reinforcement in RC structures. – Lausanne: fédération internationale du béton, 2007. – 151 p.

УДК 622.243.24:624.157.2

СИНТЕЗ СТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РЕКОНСТРУКЦИИ ПОДЗЕМНЫХ КОММУНИКАЦИЙ

Н. И. СЕМЧЕНКО, П. В. КОВТУН
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В условиях городской застройки с достаточно плотной сетью подземных коммуникаций прокладка новых и замена старых подземных сетей открытым способом затруднена. К тому же, осложняющими факторами в таких ситуациях могут являться близкое расположение существующих зданий и сооружений, а также большая глубина заложения существующих коммуникаций. Поэтому при проектировании подобного рода объектов важно предусмотреть наиболее оптимальные организационно-технологические решения.

Яркий пример влияния совокупности осложняющих факторов – реконструкция самотечного коллектора по ул. Интернациональная в г. Гомеле. Реконструируемый участок находился на глубинах 9,5–13,5 м в непосредственной близости к центральной транспортной магистрали и многоэтажному жилому дому.

Глубина заложения самотечного коллектора вблизи жилого дома – 12,8 м. В таких условиях открытый способ устройства траншеи для коллектора и поворотных колодцев неприемлем, т. к. высока вероятность деформации грунтового основания под подошвой фундамента здания. Кроме того, применение открытого способа создало бы сложности для безопасного и непрерывного функционирования крупной транспортной магистрали.

Для исключения негативных процессов было принято решение о комплексном применении технологий горизонтально направленного бурения (ГНБ) и опускного колодца.

Технология ГНБ может быть применена, как известно, при устройстве и реконструкции любых коммуникационных магистралей [1]. К тому же она экономичнее открытого метода в среднем на 40 %. Поэтому применение для данного объекта технологии ГНБ является экономически и технологически обоснованным инженерным решением – позволяет существенно сократить как сроки строительства, так и объемы земляных работ. Кроме того, для этой технологии нет сезонных ограничений и практически отсутствует негативное воздействие на окружающую среду [2].

Этапы выполнения работ по бестраншейной прокладке трубопровода с применением установки ГНБ соответствовали технологическим рекомендациям [3, 4] и включали три последовательных процесса:

– пилотное бурение;

– расширение скважины до необходимого диаметра с одновременным наращиванием и демонтажом буровых штанг и бурового оборудования;

– протаскивание плети трубопровода с одновременным демонтажом штанг и последующим демонтажом бурового оборудования.

Опускной колодец, устройство которого на данном объекте было вызвано необходимостью обеспечения свободного безопасного пространства для работы установки ГНБ, конструктивно представляет собой замкнутую в плане и открытую сверху и снизу полую конструкцию, бетонируемую над поверхностью грунта и погружаемую по мере разработки грунта внутри нее под действием собственного веса, дополнительных усилий с помощью гидродомкратов. Особенностью технологии является исключение риска осадок окружающего массива грунта в процессе возведения и погружения конструкции, а также отсутствие негативных динамических воздействий на окружающие сооружения.

Для снижения трения поверхности стенки колодца о грунт при погружении были применены конструктивные решения: нижняя часть колодца была выполнена в форме ножа из стали и густоармированной железобетонной конструкции; с внешней стороны колодца был выполнен уступ для формирования зазора между боковой поверхностью выемки и наружной поверхностью стенки колодца, заполняемого тиксотропным раствором.

Использование тиксотропного глинистого раствора обеспечивает заполнение пространства между грунтом и стенкой колодца, что предотвращает осыпание грунта, служит смазкой и сводит к минимуму силы трения, возникающие при погружении тяжелой массивной конструкции. Значение тиксотропной рубашки далеко не ограничивается только уменьшением сил трения – данная техно-

логия создает ряд дополнительных преимуществ. Такая рубашка заметно уменьшает водопроницаемость стенок колодца, предотвращает вероятность зависания его в грунте, обеспечивает спокойное и ровное погружение без местных просадок грунта вокруг колодца, что на данном объекте с учетом всех осложняющих факторов было весьма актуально. Кроме того, благодаря применению глинистого раствора стало возможным значительное уменьшение толщины стенок колодца относительно той, которая требуется при сухом способе опускания.

Немаловажное значение при работах вблизи жилых зданий имеет и то, что рассматриваемый способ опускания колодцев создает меньше шума, чем сухие способы погружения, при которых для снижения сил трения конструкции с грунтом применяется вибрационное воздействие. Технология возведения подземных сооружений с применением тиксотропных рубашек уже стала классической, она хорошо проработана и проверена на практике. Тиксотропная рубашка обеспечивает смазку стенки колодца бентонитовым глинистым раствором на всю высоту, за исключением его ножевой части, имеющей в месте перехода нижнего кольца в стену уступ шириной 10–15 см. Поэтому полная сила трения между грунтом и стенками колодца развивается только на высоте ножевой части.

До начала опускания колодца вокруг него по периметру выемки была устроена специальная форшахта, в которую заливалась первоначальная порция тиксотропного раствора.

Чтобы удержать раствор из бентонитовой глины в полости возле стены колодца и не допустить протекание его во внутреннее пространство, на наружном уступе стены был выполнен замок из трех слоев транспортерной ленты, закрепленной на уступе болтами, заанкеренными в теле ножа. Пополнение раствора по мере погружения производилось через форшахту.

Геометрические размеры опускного колодца в данном случае регламентировались габаритными размерами установки ГНБ в ее рабочем положении. Работы по устройству бестраншейной прокладки самотечного коллектора осуществлялись с рабочих опускных колодцев на глубинах от 9,5 до 13,5 м. Для реализации данного проекта была выбрана схема устройства опускных колодцев с монолитными стенками с постепенным наращиванием их высоты по мере погружения колодцев под собственным весом.

Таким образом, синтез двух методов позволил произвести работы в кратчайшие сроки без нарушения движения городского транспорта по одной из главных артерий города и полного исключения воздействия вибраций на существующие здания и сооружения. В процессе реконструкции данного участка самотечного коллектора было выполнено семь опускных колодцев и произведено устройство коллектора методом ГНБ общей протяженностью более 600 м диаметром от 400 до 630 мм.

Список литературы

1 **Ковтун, П. В.** Опыт применения горизонтально направленного бурения / П. В. Ковтун, С. Г. Дробов, М. А. Шамова // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2025. – № 1. – С. 18–22.

2 **Дробов, С. Г.** Влияние подземного горизонтального направленного бурения на окружающую среду / С. Г. Дробов, М. А. Шамова // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа, 16–17 нояб. 2023 г., г. Гомель : в 2 ч. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель, 2023. – Ч. 1. – С. 383–385.

3 **Курицын, К. Р.** ТК-1000294434.003-2015 Технологическая карта на бестраншейную прокладку трубопроводов диаметрами 100–900 мм методом горизонтального направленного бурения с применением бурильной установки Ditch Witch JT Ditch Witch JT3020 / К. Р. Курицын, Н. И. Паршина. – Минск : ОАО «ОРГСТРОЙ», 2015. – 129 с.

4 **Храменков, С. В.** Технологии восстановления подземных трубопроводов бестраншейными методами : учеб. пособие для студ. вузов / С. В. Храменков, В. А. Орлов, В. А. Харькин. – М. : Изд-во Ассоциации строит. вузов, 2004. – 237 с.

УДК 621.65.004.18

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПОВЫСИТЕЛЬНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Н. П. СЕРЕДА
ГП «Гомельводоканал», Республика Беларусь

Повысительные насосные станции являются неотъемлемым элементом систем централизованного водоснабжения крупных городов, обеспечивая нормативные параметры давления и беспере-

бойную подачу воды потребителям в условиях многоэтажной застройки. Вместе с тем значительная часть таких объектов была введена в эксплуатацию несколько десятилетий назад и в настоящее время функционирует в условиях изменившихся гидравлических режимов и высокой неравномерности водопотребления. Физический и моральный износ насосного оборудования, трубопроводов и запорно-регулирующей арматуры, а также недостаточный уровень автоматизации приводят к повышенному энергопотреблению, снижению надежности и увеличению эксплуатационных затрат [1].

Особую актуальность приобретает задача повышения энергоэффективности повысительных насосных станций. Работа насосных агрегатов в неоптимальных режимах, отсутствие частотно-регулируемых электроприводов и автоматизированных систем управления зачастую сопровождаются формированием избыточных напоров в сети, ростом гидравлических потерь и ускоренным износом оборудования. В этих условиях внедрение современных технических и организационных решений является необходимым условием устойчивого функционирования систем водоснабжения [2]. Целью настоящего исследования являлась комплексная оценка технического состояния и режимов эксплуатации повысительных насосных станций города Гомеля, а также разработка практических рекомендаций по повышению их энергоэффективности и надежности на основе сопоставительного анализа объектов с различным уровнем технического оснащения.

В 2026 году проведено комплексное обследование 69 повысительных насосных станций (ПНС) системы водоснабжения города Гомеля, выполнена оценка их технического состояния, режимов эксплуатации и уровня автоматизации. Установлено, что 58 % станций эксплуатируются с превышением нормативного срока службы, а 62 % насосных агрегатов отработали свой ресурс и требуют замены или капитального ремонта. Запорно-регулирующая арматура находится в неудовлетворительном состоянии на 52 % объектов, что обусловливает повышенные гидравлические потери и затрудняет локализацию аварийных участков. Только 26 % станций оснащены исправной арматурой, а полноценные автоматизированные системы управления с частотным регулированием отсутствуют более чем на половине ПНС.

В ходе детального обследования были выбраны два типовых объекта: ПНС «Минская 8» (подземное исполнение, ввод в эксплуатацию в 1978 г.) и ПНС «Головацкого 138» (произведена модернизация в 2008 г.). Сравнительный анализ этих станций позволил количественно оценить влияние уровня технического оснащения на энергетическую эффективность.

На ПНС «Минская 8» эксплуатируется насосный агрегат КМ 65/60/160 мощностью 5,5 кВт без частотного регулирования, с прямым пуском от сети. Фактическое давление на выходе составляет 0,54 МПа при требуемом по нормативу СН 4.01.01-2019 значении 0,44 МПа, что указывает на систематическую работу с избыточным напором и нерациональное потребление энергии. Гидравлическая мощность насоса при подаче 25 м³/ч и напоре 32 м составляет 2,18 кВт, а коэффициент полезного действия, рассчитанный по отношению полезной мощности к номинальной, не превышает 40 %.

ПНС «Головацкого 138» оснащена тремя современными насосами КМ 100/80/160 мощностью 15 кВт каждый, с индивидуальными частотными преобразователями, системой автоматической ротации по моточасам и удаленной диспетчеризацией. В ходе ранее проведенной модернизации устаревшие насосы К 100/65/200А были заменены на менее мощные, но более соответствующие фактическим условиям эксплуатации, что позволило снизить удельное энергопотребление и обеспечить стабильное поддержание нормативного давления независимо от колебаний водоразбора.

Для ПНС «Минская 8» был выполнен технико-энергетический расчет целесообразности внедрения частотно-регулируемого привода. Исходя из требуемого снижения напора с 32 до 22 м (для обеспечения выходного давления 0,44 МПа при входном 0,22 МПа), отношение частот вращения после и до регулирования составило 0,83. Потребляемая мощность может снизиться с 5,5 до 3,1 кВт, что соответствует экономии около 43 % электрической энергии. При этом коэффициент полезного действия насосного агрегата увеличится до 56 % за счет смещения рабочей точки в зону оптимальных характеристик. Годовое энергопотребление до модернизации оценивалось в 48 180 кВт·ч (при круглосуточной работе), после модернизации, с учетом дифференцированного режима (16 ч – средняя нагрузка 3,0 кВт, 8 ч – ночной режим 2,0 кВт), оно составит 23 360 кВт·ч. Таким образом, годовая экономия электроэнергии достигает 24 820 кВт·ч, что более чем на 50 % превышает исходный уровень. Дополнительными эффектами являются снижение пусковых токов, уменьшение динамических нагрузок на трубопроводы и арматуру, а также повышение надежности водоснабжения за счет автоматической ротации и защиты от аварийных режимов.

Полученные результаты подтверждают, что комплексная модернизация повысительных насосных станций, включающая замену насосного оборудования на агрегаты с характеристиками, согласованными с фактическим водопотреблением, внедрение частотно-регулируемых электроприводов и автоматизированных систем управления, позволяет существенно повысить энергоэффективность и эксплуатационную устойчивость. На основе проведенного обследования разработаны практические рекомендации по поэтапной замене изношенных трубопроводов, обновлению запорно-регулирующей арматуры, организации диспетчерского контроля и оптимизации гидравлических режимов с учетом суточной и сезонной неравномерности водоразбора. Предложенные решения носят универсальный характер и могут быть применены при модернизации аналогичных объектов водоснабжения, находящихся в неудовлетворительном техническом состоянии, что подтверждает их практическую значимость и целесообразность использования в рамках программ энергосбережения на городском уровне.

Проведенное исследование показало, что большинство повысительных насосных станций города Гомеля характеризуются высокой степенью физического износа оборудования и недостаточным уровнем автоматизации, что приводит к повышенному энергопотреблению и снижению надежности водоснабжения. Сравнительный анализ двух типовых объектов продемонстрировал, что внедрение частотно-регулируемых электроприводов и автоматизированных систем управления позволяет снизить годовое энергопотребление более чем на 50 %, повысить КПД насосного оборудования и обеспечить стабильное поддержание нормативного давления в сети. Разработанные рекомендации могут быть использованы в качестве типовых решений при модернизации аналогичных объектов, что подтверждает их практическую значимость и целесообразность применения в рамках программ энергосбережения на муниципальном уровне.

Список литературы

1 **Новикова, О. К.** Реконструкция систем водоснабжения и канализации : учеб. пособие / О. К. Новикова. – Гомель : БелГУТ, 2023. – 212 с.

2 СН 4.01.01-2019. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – Введ. 09.07.2020. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2020. – 78 с.

УДК 628.12

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ ПОВЫСИТЕЛЬНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Н. П. СЕРЕДА
ГП «Гомельводоканал», Республика Беларусь

Насосные станции систем централизованного водоснабжения являются основными потребителями электрической энергии в структуре жилищно-коммунального хозяйства, при этом эксплуатационные затраты на электроэнергию могут достигать половины себестоимости услуг водоснабжения. В условиях постоянного роста тарифов на энергоносители и высокой степени физического износа инженерной инфраструктуры проблема повышения энергоэффективности насосных агрегатов приобретает не только экономическое, но и технологическое значение, определяя устойчивость функционирования систем водоснабжения в целом.

Одной из главных причин неэффективного потребления энергии является формирование избыточных напоров в напорных трубопроводах, возникающих при работе насосов при малых расходах воды. Данный эффект усугубляется тем, что значительная часть насосных станций была запроектирована и введена в эксплуатацию с резервом по мощности, не соответствующим фактическим графикам водоразбора, сложившимся в условиях современной жилой застройки. В результате насосное оборудование эксплуатируется в неоптимальных режимах, характеризующихся пониженным коэффициентом полезного действия и ускоренным износом проточной части, а также сопровождается повышенными гидравлическими потерями в сети и дополнительными эксплуатационными затратами.

Анализ литературных источников [1] и эксплуатационной практики показывает, что традиционные методы регулирования подачи, основанные на дросселировании на напорном трубопроводе

или ступенчатом включении агрегатов, приводят к дополнительным гидравлическим потерям и не позволяют гибко адаптироваться к переменному водопотреблению. Дросселирование, широко применяемое на действующих насосных станциях, увеличивает удельный расход электроэнергии на перекачку единицы объема жидкости и снижает общий КПД системы. Ступенчатое включение насосов является более экономичным по сравнению с дросселированием, однако не позволяет эффективно адаптировать работу станции к плавно изменяющемуся расходу воды, что особенно актуально в условиях суточной и сезонной неравномерности водопотребления, характерной для жилой застройки. Более перспективным направлением признается применение частотно-регулируемых электроприводов (ЧРП), обеспечивающих плавное изменение частоты вращения рабочих колес в зависимости от текущего давления в сети. Однако сам по себе частотный преобразователь не гарантирует экономии энергоресурсов, поскольку при глубоком регулировании возможно снижение КПД насоса и ухудшение кавитационных характеристик. Энергетическая эффективность регулируемого электропривода зависит от диапазона изменения подачи воды, крутизны характеристики трубопроводной сети, характеристик насоса и числа параллельно работающих агрегатов. В связи с этим возникает необходимость комплексного подхода, включающего предварительный подбор насосного оборудования, согласование его характеристик с параметрами сети водоснабжения и выбор рациональных алгоритмов управления [2].

Большой запас мощности насосных агрегатов в современных условиях роста тарифов на электроэнергию приводит к существенному увеличению эксплуатационных затрат. Использование насосных агрегатов, согласованных по мощности с фактическими нагрузками, в сочетании с частотным регулированием позволяет существенно снизить расход электроэнергии, а замена насосов избыточной производительности на агрегаты меньшей мощности дает возможность сократить суточное электропотребление более чем в два раза. Наличие избыточного давления в водопроводной сети увеличивает непроизводственные расходы воды на 13–20 % и приводит к дополнительным энергетическим затратам, что подтверждает необходимость оптимизации режимов работы насосного оборудования с учетом реальных условий водопотребления.

Анализ фактических режимов работы насосных станций на основе статистической обработки эксплуатационных данных с учетом суточной, недельной и сезонной неравномерности водопотребления, показавает, что применение ступенчатого регулирования с частотным управлением позволяет повысить энергетическую эффективность насосных агрегатов на 9,7 % по сравнению с режимом постоянного давления и на 20,8 % по сравнению с нерегулируемым режимом работы при минимальных дополнительных затратах.

Значительный потенциал повышения эффективности заложен также в совершенствовании систем автоматизации и диспетчеризации. Современные насосные станции представляют собой сложные электрогидравлические комплексы, функционирующие в условиях переменных нагрузок и повышенных требований к надежности. Автоматизация позволяет не только стабилизировать давление на выходе, но и реализовать функции ротации насосных агрегатов по наработке моточасов, что способствует равномерному износу оборудования и увеличению межремонтного ресурса.

Возможно применение двух вариантов построения систем управления: индивидуальное частотное регулирование каждого насоса и каскадное регулирование, при котором один насос работает в регулируемом режиме, а остальные подключаются по мере роста нагрузки. Каскадное регулирование обеспечивает приемлемое качество управления при относительно низких капитальных затратах, повышает энергоэффективность и стабильность давления у потребителей.

К основным требованиям к системам управления насосными станциями можно отнести: контроль технологических параметров, защиту от аварийных режимов, управление частотно-регулируемым приводом и запорной арматурой, обеспечение бесперебойного электроснабжения, а также наличие локальных и дистанционных средств индикации и управления.

Эффективное управление должно базироваться на непрерывном мониторинге гидравлических и энергетических параметров в режиме реального времени, что достигается внедрением SCADA-систем и централизованных диспетчерских пунктов. Диспетчеризация насосных станций является основным фактором повышения надежности и экономичности систем водоснабжения, поскольку централизованное управление позволяет в режиме реального времени контролировать состояние насосных агрегатов, электропитания и запорной арматуры, а также оперативно реагировать на аварийные ситуации.

Особое внимание в современных исследованиях уделяется вопросам комплексной оптимизации насосных установок с учетом характеристик насосов, электродвигателей и гидравлической сети. Частотное регулирование не всегда приводит к снижению энергопотребления, поскольку при изменении частоты вращения рабочего колеса изменяются не только напорные характеристики, но и значения КПД насосов. В качестве перспективного направления возможно применение комбинированных насосных агрегатов с параллельным подключением центробежных и биротрных насосов с изменяемой частотой вращения, что позволяет расширить рабочее поле насосной установки и обеспечить максимальный КПД в заданном диапазоне режимов.

Снижение энергетической эффективности насосных агрегатов связано главным образом с несоответствием характеристик насосов параметрам трубопроводной сети и режимам эксплуатации, при этом большинство существующих алгоритмов управления параллельными насосами ориентированы на порядок включения агрегатов и не учитывают оптимизацию частот вращения с точки зрения суммарного КПД насосной группы.

Обобщение современных научно-технических подходов позволяет заключить, что повышение эффективности работы насосных станций должно представлять собой системную задачу, решаемую на основе сочетания технических, организационных и эксплуатационных мероприятий с учетом условий сети водоснабжения и технического состояния оборудования. Внедрение автоматизированных систем управления, частотно-регулируемых электроприводов и оптимизация гидравлических режимов имеют прикладной характер и позволяют повысить энергоэффективность, надежность и эксплуатационную устойчивость насосных станций. При этом экономия электроэнергии достигается не только за счет снижения избыточных напоров, но и за счет перемещения рабочей точки насоса вдоль характеристики трубопроводной сети, что обеспечивает работу агрегата в зоне наилучшего КПД. Комплексный подход к модернизации должен учитывать не только замену насосного оборудования и внедрение частотного регулирования, но и обновление запорно-регулирующей арматуры, оптимизацию конфигурации трубопроводных систем, внедрение систем диспетчеризации и повышение квалификации обслуживающего персонала. Только при условии реализации всех перечисленных направлений возможно достижение устойчивого повышения энергетической эффективности и надежности функционирования систем водоснабжения в целом, что подтверждается как теоретическими расчетами, так и практическим опытом эксплуатации модернизированных объектов.

Список литературы

1 **Новикова, О. К.** Реконструкция систем водоснабжения и канализации : учеб. пособие / О. К. Новикова. – Гомель : БелГУТ, 2023. – 212 с.

2 СН 4.01.01-2019. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – Введ. 09.07.2020. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2020. – 78 с.

УДК 624.075.23.012.45:004

РАСЧЁТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ В ПК ЛИРА-САПР И СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С НОРМАМИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

В. А. СИРОШ, Д. В. ДОВЫДЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г, Гомель

Расчёт железобетонных колонн – одна из наиболее ответственных задач при проектировании несущего каркаса здания. Колонны, как правило, работают в условиях внецентренного сжатия: продольная сила приложена с эксцентриситетом, вызванным как конструктивными особенностями (смещение ригелей, жёсткость узлов), так и случайными факторами (неидеальность геометрии, неоднородность бетона). Современные программные комплексы, такие как ЛИРА-САПР, позволяют автоматизировать процесс подбора арматуры, однако корректность результатов напрямую зависит от соответствия заложенных в программу алгоритмов действующей нормативной базе [3].

На территории Республики Беларусь основным нормативным документом для проектирования железобетонных конструкций является СП 5.03.01-2020, введённый взамен СНБ 5.03.01-02 с 16 но-

ября 2020 года [1]. Документ гармонизирован с положениями EN 1992-1-1:2004 (Еврокод 2) и учитывает концепцию надёжности, принятую в EN 1990. Кроме того, для расчётов по Еврокоду применяется ТКП EN 1992-1-1-2009* – технический кодекс установившейся практики, реализующий положения Еврокода 2 в национальных условиях [2, 4].

1 *Методика расчёта в ПК ЛИРА-САПР.*

ПК ЛИРА-САПР реализует несколько нормативных баз для расчёта железобетонных конструкций, в том числе СП 63.13330 (Российская Федерация) и ТКП EN 1992-1-1-2009* (Республика Беларусь). Для колонн, как стержневых элементов, выполняются следующие виды проверок:

– расчёт по прочности нормальных сечений (подбор продольной арматуры при действии продольной силы N и изгибающих моментов M_y, M_x);

– расчёт по прочности на действие поперечной силы V;

– расчёт на действие крутящих моментов;

– расчёт по второй группе предельных состояний (ширина раскрытия трещин).

В основе расчёта по прочности нормальных сечений в ЛИРА-САПР лежит нелинейная деформационная модель, реализующая положения п. 8.1.20–8.1.30 СП 63.13330 и аналогичные разделы EN 1992-1-1. Модель предполагает разбиение сечения на участки (бетон и арматура), задание для каждого из них диаграммы деформирования и последовательное решение уравнений равновесия при изменении кривизны оси элемента. При подборе арматуры программа варьирует площади сечения стержней в рамках заданных пользователем логических групп унификации, ограничений по диаметру и количеству стержней.

Для учёта продольного изгиба в ЛИРА-САПР используется аппарат расчётных длин и коэффициентов μ, задаваемых пользователем в диалоге параметров конструирования. Расчётные длины колонн принимаются в зависимости от условий сопряжения с горизонтальными конструкциями: для рядовых колонн многоэтажных зданий при монолитном каркасе $l_0 = 0,7H$, при сборном – $l_0 = H$, где H – высота этажа.

2 *Нормативная база Республики Беларусь.*

СП 5.03.01-2020 содержит как деформационные методы расчёта (модель сопротивления срезу на основе модифицированной теории полей сжатия – MCFT), так и традиционные модели метода предельных усилий. Документ предусматривает:

– назначение расчётных сопротивлений бетона $f_{cd} = \alpha_{cc}\, f_{ck} / \gamma_c$, где α_{cc} – коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузки и благоприятные эффекты (по умолчанию 1,0); $\gamma_c = 1,5$ – частный коэффициент безопасности по бетону;

– назначение расчётных сопротивлений арматуры $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$, где $\gamma_s = 1,15$;

– учёт коэффициентов условий работы бетона $\gamma_{b3} = 0,85$ при бетонировании в вертикальном положении (высота слоя бетонирования более 1,5 м);

– учёт влияния продольного изгиба через коэффициент η, определяемый по методу номинальной кривизны или методу номинального эксцентриситета согласно EN 1992-1-1.

При расчёте по ТКП EN 1992-1-1-2009* в ЛИРА-САПР пользователь задаёт класс бетона по EN 206 (например, C25/30), класс арматуры (S500), параметры защитного слоя, расчётные длины, а также опционально – коэффициенты ползучести, относительную влажность и возраст бетона к моменту нагружения. Программа автоматически определяет коэффициент ползучести φ согласно приложению B EN 1992-1-1, что исключает необходимость ручного вычисления этого параметра.

3 *Численный пример и сравнение результатов.*

Рассмотрим колонну прямоугольного сечения 400×400 мм высотой этажа H = 4,2 м, выполненную из бетона класса C25/30 и арматуры S500. Расчётная продольная сила $N_{Ed} = 1200$ кН, изгибающий момент $M_{Ed} = 60$ кН·м. Колонна относится к рядовой колонне монолитного каркаса, расчётная длина $l_0 = 0,7H = 2,94$ м.

Ручной расчёт по СП 5.03.01-2020. Расчётное сопротивление бетона осевому сжатию

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc}\, f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{1,0 \cdot 25}{1,5} = 16,67 \text{ МПа}.$$

С учётом коэффициента $\gamma_{b3} = 0,85$ для вертикального бетонирования

$$f_{cd,red} = 0{,}85 \cdot 16{,}67 = 14{,}17 \text{ МПа}.$$

Расчётное сопротивление арматуры

$$f_{yd} = \frac{500}{1{,}15} = 435 \text{ МПа}.$$

Рабочая высота сечения $d = h - a = 400 - 40 = 360$ мм. Относительная высота сжатой зоны

$$\xi = \frac{N_{Ed}}{f_{cd,red} b d} = \frac{1200 \cdot 10^3}{14{,}17 \cdot 400 \cdot 360} = 0{,}589 .$$

Поскольку $\xi > \xi_{\lim}$ (где $\xi_{\lim} \approx 0{,}532$ для арматуры S500), требуется постановка сжатой арматуры. После выполнения расчёта по формулам внецентренного сжатия с учётом коэффициента продольного изгиба $\eta = 1{,}12$ получаем требуемую площадь симметричной арматуры

$$A_{s,red} = A'_{s,red} \approx 6{,}8 \text{ см}^2.$$

Расчёт в ПК ЛИРА-САПР. При задании тех же исходных данных (бетон С25/30 по ТКП EN 1992-1-1-2009*, арматура S500, расчётная длина $l_0 = 2{,}94$ м, коэффициент $\gamma_{b3} = 0{,}85$) программа формирует результат подбора арматуры в трёх строках: полная арматура, арматура по первой группе предельных состояний и арматура, обусловленная кручением [10]. Для рассматриваемой колонны программа выдаёт:

$$A_{s,LIRA} = 4 \cdot 3{,}45 = 13{,}8 \text{ см}^2.$$

Анализ расхождений. Полученное в программе значение площади арматуры значительно превышает результат ручного расчёта. При детальном анализе причин расхождения были выявлены следующие факторы:

1 Коэффициенты условий работы бетона. Произведение коэффициентов $\gamma_{b1} \cdot \gamma_{b2} \cdot \gamma_{b3}$ в программном расчёте составляет $0{,}9 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}85 = 0{,}765$, тогда как в ручном расчёте принят единый коэффициент 0,85. Различие в эффективном расчётном сопротивлении бетона достигает 11 %, что напрямую влияет на требуемое армирование.

2 Учёт случайного эксцентриситета. ЛИРА-САПР автоматически учитывает случайный эксцентриситет e_a согласно требованиям норм, принимая его не менее 1/30 высоты сечения, 1/600 длины элемента и 10 мм. В ручном расчёте значение e_a может быть принято иначе в зависимости от трактовки конкретного пункта норм.

3 Метод учёта продольного изгиба. Программа реализует деформационную модель с пошаговым изменением кривизны, тогда как ручной расчёт использует упрощённую формулу коэффициента η через условную критическую силу N_{cr}. Различие в подходах приводит к отличиям в определении эффективного эксцентриситета.

4 Для корректного сопоставления результатов необходимо привести исходные данные к единому виду. При задании в ЛИРА-САПР пользовательского класса бетона с расчётным сопротивлением, увеличенным на отношение коэффициентов 0,85/0,765 = 1,111, и при согласовании всех остальных параметров (расчётная длина, защитный слой, случайный эксцентриситет) результаты программного и ручного расчётов совпадают с точностью до 3–5 %.

Выводы.

1 ПК ЛИРА-САПР обеспечивает полный цикл расчёта железобетонных колонн по нормам Республики Беларусь (ТКП EN 1992-1-1-2009*), включая подбор и проверку продольной и поперечной арматуры, расчёт по второй группе предельных состояний и конструирование рабочего чертежа.

2 Основные расхождения между результатами программного и ручного расчётов обусловлены различиями в учёте коэффициентов условий работы бетона, автоматическим учётом случайных эксцентриситетов и применением нелинейной деформационной модели вместо упрощённых формул метода предельных усилий.

3 Для получения корректных результатов в ЛИРА-САПР необходимо тщательно верифицировать исходные параметры: классы материалов, коэффициенты условий работы, расчётные длины, защитный слой и параметры ползучести. При несовпадении условий автоматического и ручного счёта рекомендуется приведение исходных данных к единому базису.

4 При корректном задании исходных данных результаты программного расчёта в ЛИРА-САПР и ручного расчёта по СП 5.03.01-2020 показывают удовлетворительное совпадение, что подтверждает достоверность программной реализации и возможность её использования для проектных расчётов.

Список литературы

1 СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Введ. 16.11.2020. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 236 с.

2 ТКП EN 1992-1-1-2009*. Проектирование железобетонных конструкций. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий. – Введ. 01.01.2010. – Минск, 2009.

3 **Евстропов, К. А.** Расчёт прочности нормальных сечений внецентренно сжатых железобетонных колонн с повреждениями в ПК ЛИРА САПР / К. А. Евстропов // Современные строительные конструкции, материалы и технологии : сб. тезисов I Междунар. науч. конф., Брест, 19–21 нояб. 2025 года / М-во образования Респ. Беларусь, Брест. гос. техн. ун-т, Науч.-исслед. центр инноваций в строительстве; редкол. : В. В. Тур, А. Я. Найчук, Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2025. – С. 100–101.

4 **Тур, В. В**. Строительные правила СП 5.03.01.2020 в свете требований FIB Model Code 2020 и PREN1992 второго поколения / В. В. Тур, Н. А. Рак // Проблемы современного строительства : сб. науч. трудов, Минск, 23 мая 2023 г. / редкол. : В. В. Бондарь, В. Ф. Зверев, Е. А. Козловский. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 25–33.

УДК 692.522:624.012.616.6

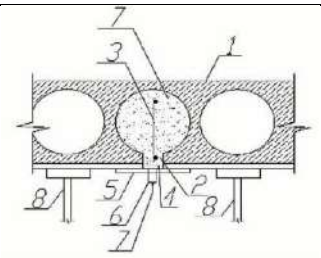
СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ УСИЛЕНИЯ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ С КРУГЛЫМИ ПУСТОТАМИ

В. А. СОКОЛОВСКИЙ, В. В. ТАЛЕЦКИЙ

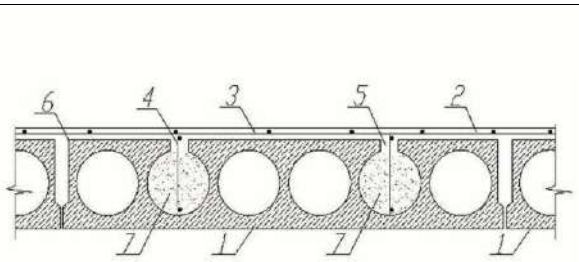
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

При увеличении нагрузок на перекрытие жилых и общественных зданий, при реконструкции или обнаружении дефектов выполняют усиление плит с круглыми пустотами. Имеется несколько наиболее применяемых вариантов усиления увеличивающих несущую способность плит:

– армирование нескольких каналов пустот (количество определяется расчетом) плоскими каркасами. В верхней или нижней полке плиты вдоль круглых пустот прорезается полоса, устанавливается плоский каркас и пустота заполняется мелкозернистым бетоном (рисунок 1);



Установка каркасов снизу плиты:
1 – усиливаемая железобетонная плита; *2* – щели, прорезанные вдоль пустот со стороны потолка; *3* – арматурный каркас, устанавливаемый в пустоту через прорезанные щели; *4* – коротыши для крепления каркаса к оголённой арматуре плиты; *5* – щит опалубки, устанавливаемый на щели; *6* – штуцер, устанавливаемый в опалубке для закачивания бетонной смеси; *7* – бетонная смесь, закачиваемая в пустоты; *8* – временные разгружающие стойки



Установка каркасов сверху плиты:
1 – усиливаемая железобетонная плита; *2* – монолитный слой бетона; *3* – арматурная сетка; *4* – арматурный каркас; *5* – прорезанные вдоль пустот щели для установки каркаса; *6* – поверхность сцепления монолитного бетона с плитами; *7* – бетон замоноличивания вырезанных полок и пустот

Рисунок 1 – Армирование каналов пустот плоскими каркасами

– подведение металлических разгружающих балок (двутавров или швеллеров) сверху. В верхней полке плиты по всей длине круглой пустоты прорезается полоса. В стенах, в местах опирания плиты напротив этой полосы вырубаются ниши для заведения балок. Устанавливаются разгружающие балки, пустоты и ниши заполняются мелкозернистым бетоном (рисунок 2);

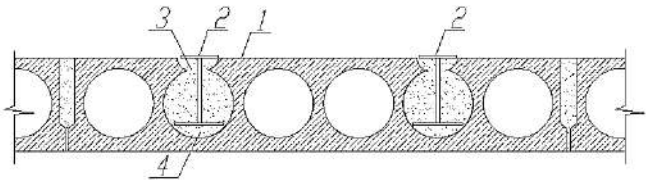


Рисунок 2 – Усиление подведением металлических балок:
1 – усиливаемая железобетонная плита; *2* – разгружающие балки из двутавров; *3* – вырезанные полки плит для установки балок;
4 – бетон замоноличивания вырезанных полок и пустот

– устройство набетонки толщиной 40–80 мм по верху усиливаемой плиты. Для обеспечения сцепления плиты с набетонкой производится зачистка, насечка и промывка поверхности плиты. Устанавливается сетка и выполняется бетонирование. Если сцепление недостаточное, то сетка анкеруется (рисунок 3);

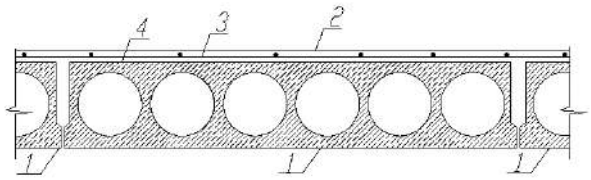


Рисунок 3 – Устройство набетонки по верху усиливаемой плиты:
1 – усиливаемая железобетонная плита; *2* – монолитный слой бетона; *3* – арматурная сетка усиления;
4 – поверхность сцепления монолитного бетона с плитами (зачистка, насечка, промывка водой)

– внешнее армирование композитными материалами. Наклейка углеродных лент или холстов на растянутую (нижнюю) поверхность плиты на эпоксидный клей (рисунок 4).

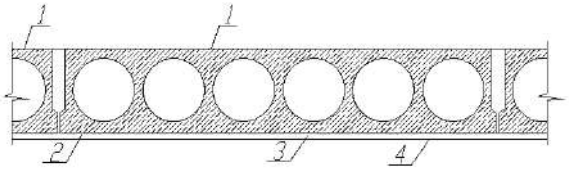


Рисунок 4 – Наклейка углеродных лент или холстов:
1 – усиливаемая железобетонная плита; *2* – очищенная и обезжиренная поверхность плит; *3* – эпоксидный клей;
4 – углеродные ленты или холст

Рассмотрим следующие критерии технико-экономического сравнения приведенных вариантов усиления: прирост прочности плит перекрытия; трудоёмкость; увеличение высоты перекрытия; относительная стоимость.

При армировании каналов пустот плоскими каркасами эффективный прирост прочности составляет от 50 до 70 %, высота плит перекрытия не изменяется. Трудоёмкость высокая, так как усиление связано с мокрыми процессами. Относительная стоимость по сравнению с остальными вариантами усиления средняя.

Подведением металлических балок можно увеличить несущую способность плит до 100 %. Высота плит перекрытия может меняться только в местах установки разгружающих балок, если они будут выступать за пределы верха плиты. Трудоёмкость высокая, так как усиление так же связано с мокрыми процессами. Относительная стоимость по сравнению с остальными вариантами усиления средняя. Оптимальное решение усиления при локальном усилении зон вокруг новых технологических проёмов.

Устройством набетонки эффективно увеличивать прочность плит перекрытия до 40 % (зависит от толщины и армирования). Высота плит перекрытия увеличивается на толщину набетонки. Трудоёмкость средняя. Относительная стоимость по сравнению с остальными вариантами усиления низкая. Экономически оправдана при масштабной реконструкции всего здания.

Наклейкой углеродных лент или холстов на растянутую (нижнюю) поверхность плиты на эпоксидный клей можно увеличить несущую способность плит от 40 до 60 %. Толщина плит увеличивается не более чем на 5 мм. Трудоемкость минимальная, так как практически не связана с мокрыми процессами. Стоимость усиления высокая, так как до 70–80 % бюджета составляет стоимость само-

го материала. Экономически выгодна на эксплуатируемых объектах, где минимальные сроки выполнения работ и недопустимо уменьшение высоты помещений или утяжеление конструкций.

Окончательная экономическая эффективность вариантов усиления плит перекрытия с круглыми пустотами всегда рассчитывается с учетом стоимости времени производства работ, возможного простоя и затрат на поставку материалов на строительную площадку.

УДК 666.97.035

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА

М. А. СТЕПАНЕНКО, А. Г. ТАШКИНОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Тепловлажностная обработка (ТВО) – один из самых энергоёмких этапов производства сборного железобетона. Именно на неё приходится значительная доля затрат тепловой энергии на заводе, и именно с ней связаны характерные дефекты структуры бетона: трещины от температурных градиентов, пересушивание поверхностных слоёв, недобор прочности при форсированном остывании. В условиях постоянного роста стоимости энергоносителей поиск резервов снижения энергозатрат на ТВО без потери качества изделий становится практически значимой задачей.

Цель работы – систематизировать основные направления совершенствования режимов ТВО бетона на основе действующей нормативной базы Республики Беларусь и результатов отечественных исследований. Для этого решались следующие задачи: проанализировать нормативные предпосылки назначения энергосберегающих режимов; рассмотреть возможности химической модификации бетонной смеси; оценить теплотехнические резервы (термосные и импульсные режимы); затронуть вопросы автоматизации управления и карбонизационной стойкости бетона после ТВО.

С 1 июля 2021 года в Республике Беларусь действуют строительные правила СП 5.03.02-2021 «Изготовление бетонных и железобетонных изделий» [1]. Одновременно отменён ранее действовавший ТКП 45-5.03-307-2017. При этом методическая база по назначению режимов ТВО сохранилась: СП 5.03.02-2021 применяется совместно с пособиями П1-2018, П2-2018 и П3-2018 к ТКП 45-5.03-307-2017.

Пособие П2-2018 [2] ориентирует на применение режимов с пониженной температурой разогрева: это позволяет сократить расход энергии в 1,5–2 раза по сравнению с режимами при 80–85 °С.

При назначении режима важно помнить, что бетон продолжает набирать прочность после распалубки, в процессе остывания изделий в цехе. Нормативы учитывают это через коэффициент увеличения прочности: если распалубочная прочность составляет 35–40 % от проектной, коэффициент равен 2,0–2,3; если 70–80 % – всего 1,1–1,2. Отсюда практический вывод: ускорять ТВО ради высокой распалубочной прочности экономически невыгодно – бетон может добрать ее сам.

Для лёгких бетонов отдельно нормируется отпускная влажность – по эмпирической зависимости от начального водосодержания, расхода цемента, интенсивности испарения и толщины изделия. Это позволяет ещё на стадии подбора состава оценить риск пересушивания и заранее принять меры: снизить водосодержание, отказаться от горячего керамзита, повысить жёсткость смеси.

Наиболее результативное направление химической модификации бетона – применение комплексных добавок. Исследование, выполненное в Полоцком государственном университете [3], показало: введение поликарбоксилатного суперпластификатора совместно с воздухововлекающей добавкой позволяет снизить температуру изотермического прогрева с 60 до 40 °С и сократить его длительность с 5 до 3 часов. Прочность при этом не только не падает, но в 28-суточном возрасте на 15–20 % превышает прочность бездобавочного состава, твердевшего в нормальных условиях.

Существенно, что эффективность добавок проявляется именно при пониженных температурах ТВО. Сравнение двух комплексов – «Хидетал ГП-9-Альфа + Хидетал П8» и «Стахемент 2000М + Микропоран» – показало преимущество первого именно для «мягких» режимов. Это подтверждает возможность перехода от высокотемпературной обработки (80–90 °С) к низкотемпературной (40–60 °С), что снижает градиенты температур по сечению изделия и риск трещинообразования.

Отдельная проблема – отсутствие в нормативах расчётных формул для поликарбоксилатных суперпластификаторов. Коэффициенты $K_{f,м1}$ и $K_{f,м2}$, учитывающие влияние модификаторов, для этого класса добавок не приведены, поэтому режимы ТВО приходится назначать экспериментально.

Обобщение +данных литературных источников позволяет выделить ориентировочные параметры: предварительное выдерживание 3–6 ч, скорость подъёма температуры не более 10 °С/ч, изотермический прогрев при 40–60 °С, содержание добавки не более 0,5 % от массы цемента.

Помимо химии, значительный резерв заложен в самой структуре теплового воздействия. Согласно [2], при выборе между термосным и изотермическим выдерживанием предпочтение следует отдавать термосному как менее энергозатратному. Изотермический прогрев применяют только тогда, когда термосное выдерживание не обеспечивает требуемой прочности к моменту распалубки, и его продолжительность стремятся свести к минимуму. Скорость остывания среды в камере – не более 30 °С/ч, а при повышенных требованиях по морозостойкости и водонепроницаемости – не более 20 °С/ч.

Практический интерес представляют импульсно-термосные режимы. Анализ кинетики твердения показывает: 30 % от R_{28} набирается уже после 5 часов подачи пара. Если в этот момент подачу прекратить, за счёт термосного остывания прочность доходит до 50–60 % от R_{28}, а расход пара сокращается на 60–70 %. В литературе приводятся данные и о более глубоком сокращении – до 70–80 % – при форсированном подъёме температуры до 80–90 °С с последующим термосным выдерживанием.

Отдельно стоит вопрос управления стадией остывания. Линейное снижение температуры в камере не позволяет одновременно выдержать ограничения по временным и пространственным градиентам. В качестве закона изменения температуры среды предложена экспоненциальная функция с постепенным замедлением охлаждения. Контроль при этом ведут не только по температуре в камере, но и по градиентам в критических точках изделия.

Нельзя обойти вниманием и теплопотери через ограждающие конструкции камер. Работы, выполненные в БелГУТе [4], показали: применение эффективных малоинерционных ограждений для ямных пропарочных камер снижает непроизводительные потери теплоты и стабилизирует температурное поле в рабочем объёме. Это особенно важно при переходе к низкотемпературным и импульсно-термосным режимам, где точность управления температурой критична.

Традиционные релейные системы автоматизации режимов ТВО с одним каналом подачи пара дают большой разброс температуры из-за запаздывания теплоты. Решение – ввести дополнительный канал подачи пара низкой мощности для изотермического режима и постоянную составляющую тепловой мощности для компенсации теплопотерь на стадии остывания. Моделирование показывает, что такой алгоритм сужает диапазон отклонений температуры и заметно сокращает число переключений паровых клапанов, а значит – снижает износ арматуры и эксплуатационные расходы.

Там, где автоматизация режима с плавно возрастающей скоростью подъёма температуры невозможна, нормативы допускают ступенчатый подъём: за 1,0–1,5 ч температура поднимается до 30–40 °С, выдерживается 2,0–2,5 ч, затем за 1,0–1,5 ч – поднимается до максимальной. Если изделия загружают в камеру, уже разогретую до 30–35 °С, выдерживание в ней без подачи пара 1,5–2,0 ч равноценно первой ступени.

Для оперативного контроля кинетики твердения предложена методика, основанная на непрерывной фиксации температуры в термокассете с расчётом интегральной температурной характеристики (в градусо-часах), коррелирующей со степенью гидратации и прочностью. Апробация на ОАО «Завод ЖБИ № 1» [5] подтвердила возможность ее применения для корректировки режимов в заводских условиях.

Совершенствование режимов ТВО – задача многофакторная, лежащая на стыке химии цементных систем, теплофизики и автоматического управления. Нормативная база Республики Беларусь создаёт основу для перехода к энергосберегающим режимам с пониженной температурой разогрева и учётом постэксплуатационного набора прочности. Экспериментально подтверждена возможность снижения температуры изотермического прогрева до 40 °С при использовании поликарбоксилатных комплексов; импульсно-термосные режимы дают сокращение расхода пара на 60–80 %. Дальнейшее развитие направления связано с внедрением адаптивных алгоритмов управления, учётом градиентных ограничений на стадии остывания.

Список литературы

1 СП 5.03.02-2021. Изготовление бетонных и железобетонных изделий. – Введ. 01.07.2021. – Минск : Минстройархитектуры, 2021.

2 Пособие П2-2018 к ТКП 45-5.03-307-2017. Тепловлажностная обработка изделий сборных бетонных и железобетонных. – Минск : Стройтехнорм, 2018.

3 **Парфенова, Л. М.** Низкотемпературная тепловлажностная обработка тяжелого бетона с комплексными добавками на основе поликарбоксилатных суперпластификаторов / Л. М. Парфенова, В. В. Марковцова, С. Ж. Раззаков // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F. Строительство. Прикладные науки. – 2025. – № 4. – С. 2–12.

4 **Ташкинов, А. Г.** Оптимизация параметров малоинерционных ограждений для камер ускоренного твердения бетонных изделий / А. Г. Ташкинов ; Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель : БелГУТ, 2012.

5 **Бабицкий, В. В.** Прогнозирование кинетики твердения бетона при термосном выдерживании конструкций / В. В. Бабицкий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2005. – № 4. – С. 66–67.

УДК 624.073.012.45:004

РАСЧЁТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «ЛИРА-САПР»: СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С НОРМАМИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Д. С. СТРИЖАК, Д. В. ДОВЫДЕНКО
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Расчёт железобетонных плит перекрытия – одна из наиболее массовых задач при проектировании гражданских и промышленных зданий. Современные программные комплексы, такие как «Лира-Сапр», позволяют автоматизировать процесс построения расчётной модели, сбора нагрузок и определения напряжённо-деформированного состояния конструкции. Однако корректность получаемых результатов напрямую зависит от того, насколько адекватно заданы исходные параметры – характеристики материалов, граничные условия, расчётные сочетания нагрузок – и в какой мере они соответствуют требованиям действующих нормативных документов.

В Республике Беларусь в настоящее время действует двойственная система нормирования железобетонных конструкций. С одной стороны, применяется национальный документ СП 5.03.01-2020 «Бетонные и железобетонные конструкции», пришедший на смену СНБ 5.03.01-02 [1]. С другой стороны, активно используется ТКП EN 1992-1-1-2009* (Еврокод 2) с национальным приложением [2]. СП 5.03.01-2020 гармонизирован с положениями Еврокода 2 и fib Model Code 2010, однако содержит ряд отличий в методиках расчёта по сравнению с предшествующими нормами. Это создаёт определённые трудности при верификации результатов численного расчёта [3].

Рассмотрим монолитную железобетонную плиту перекрытия размером в плане 6,0×4,5 м, толщиной 200 мм, шарнирно опёртую по контуру. Бетон класса С 20/25 (по системе норм Беларуси), что соответствует f_{ck} = 20 МПа. Армирование – стержневая арматура класса S500. Расчётная нагрузка на плиту принята равной q = 7,5 кН/м^2 (включая собственный вес).

Цель – выполнить расчёт плиты в ПК «Лира-Сапр», получить значения изгибающих моментов, прогибов и требуемой площади армирования, а затем сопоставить их с результатами ручного расчёта по СП 5.03.01-2020 и ТКП EN 1992-1-1-2009*.

Построение расчётной модели в ПК «Лира-Сапр». Геометрическая модель плиты создаётся с помощью пластинчатых конечных элементов (КЭ тип 41 или 42 – прямоугольные и треугольные оболочечные элементы). Сетка разбивки принята с шагом 0,5 м, что обеспечивает достаточную точность при минимальных затратах машинного времени.

Задание жёсткостных характеристик. Модуль упругости бетона E_{cm}, МПа, определяется по формуле Еврокода 2:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3},$$

где $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 28$ МПа**.** Подставляя, получаем $E_{cm} \approx 30,0$ ГПа. В тоннах-силы на квадратный метр: $E_{cm} \approx 305900$ т/м^2.

Однако при расчёте железобетонных конструкций необходимо учитывать понижение модуля упругости вследствие ползучести бетона. Согласно рекомендациям нормативной литературы, для плит перекрытий при наличии трещин понижающий коэффициент принимается равным 0,2. В «Лира-Сапр» это реализуется путём умножения начального модуля упругости на соответствующий коэффициент: $E_{b,red} = 0,2 \cdot E_{cm}$. Для рассматриваемого случая:

$$E_{b,red} = 0,2 \cdot 305900 \approx 61180 \text{ т/м}^2 \text{ .}$$

Коэффициент Пуассона для бетона принимается ν = 0,2. Удельный вес железобетона – γ = 25 кН/м^3 (или 2,5 т/м^{3}в системе единиц ПК «Лира-Сапр»).

Граничные условия. По контуру плиты задаются связи, обеспечивающие шарнирное опирание: запрещены вертикальные перемещения (Z) при свободе горизонтальных (X, Y) и всех угловых поворотов.

Нагрузки. Постоянная нагрузка (собственный вес плиты, вес конструкции пола) и временная (полезная) нагрузка задаются в виде отдельных загружений. Формирование расчётных сочетаний нагрузок (РСН) выполняется с учётом коэффициентов надёжности по нагрузке и коэффициентов сочетаний в соответствии с требованиями СН 2.01.02 (Беларусь) и ТКП EN 1990.

Результаты численного расчёта

После выполнения линейного расчёта в «Лира-Сапр» получены следующие результаты:

Параметр	Значение из ПК «Лира-Сапр»
Максимальный изгибающий момент M_x (в пролёте)	9,8 кН·м/м.
Максимальный изгибающий момент M_y (в пролёте)	6,2 кН·м/м.
Максимальный прогиб u	14,3 мм.
Требуемая площадь нижней арматуры $A_{s,x}$	2,8 см^2/м.
Требуемая площадь нижней арматуры $A_{s,y}$	1,9 см^2/м.

Подбор армирования выполнен с использованием модуля «Конструирование» ПК «Лира-Сапр» с назначением параметров бетона и арматуры, соответствующих классам по нормам Республики Беларусь.

Сопоставление с нормами Республики Беларусь

1 **Проверка прочности по нормальным сечениям.** По СП 5.03.01-2020 (п. 7.1) расчёт прочности изгибаемых элементов выполняется по деформационной модели, основанной на параболически-линейной диаграмме деформирования бетона (рисунок 3.5 СП) и двухлинейной диаграмме для арматуры. Расчётное сопротивление бетона класса С 20/25: $f_{cd} = \alpha_{cc} \, f_{ck} / \gamma_c = 1,0 \cdot 20 / 1,5 = 13,3$ МПа. Расчётное сопротивление арматуры S500: $f_{yd} = 500 / 1,15 = 435$ МПа.

Ручной расчёт по деформационной модели для момента M = 9,8 кН·м/м даёт требуемую площадь арматуры $A_s = 2,7$ см^2/м, что отличается от результата «Лира-Сапр» (2,8 см^2/м) на 3,7 %. Это расхождение объясняется тем, что «Лира-Сапр» при подборе арматуры использует итерационный алгоритм с учётом фактической высоты сжатой зоны, тогда как ручной расчёт основан на упрощённой прямоугольной эпюре напряжений.

2 **Проверка прогибов.** Предельный прогиб для плит перекрытий при пролёте 6 м согласно СН 2.01.01-2019 составляет l/200 = 30 мм. Полученный в «Лира-Сапр» прогиб 14,3 мм удовлетворяет этому требованию с значительным запасом. Однако следует отметить, что при линейном расчёте с пониженным модулем упругости прогиб определяется приближённо; более точный результат получается при нелинейном расчёте с учётом образования трещин и физической нелинейности бетона.

По СП 5.03.01-2020 (п. 8.2) прогиб определяется через кривизну элемента:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{D}, D = E_{b,eff} I_{red} \text{ ,}$$

где $E_{b,eff}$ – эффективный модуль деформации сжатого бетона с учётом ползучести; I_{red} – момент инерции приведённого сечения с учётом трещин. Ручной расчёт прогиба по данной методике даёт значение 12,8 мм, что на 10,5 % меньше, чем в «Лира-Сапр». Разница связана с тем, что в программном комплексе учитывается пространственная работа плиты (двухосное напряжённое состояние), тогда как ручной расчёт выполняется для балочной схемы.

3 **Сопоставление подходов СП 5.03.01-2020 и ТКП EN 1992-1-1-2009***. Расчёт прочности нормальных сечений в обоих документах основан на единой деформационной модели, однако имеются

различия в значениях коэффициентов: в СП 5.03.01-2020 коэффициент $\alpha_{cc} = 1{,}0$, тогда как в ТКП EN 1992-1-1 в национальном приложении Беларуси также принято $\alpha_{cc} = 1{,}0$, но в ряде стран ЕС $\alpha_{cc} = 0{,}85$. Коэффициент γ_c в обоих документах равен 1,5. Расчёт ширины раскрытия трещин в СП 5.03.01-2020 выполнен по методике, гармонизированной с Еврокодом 2, но с уточнёнными эмпирическими коэффициентами.

Выводы

1 Результаты расчёта железобетонной плиты перекрытия, полученные в ПК «Лира-Сапр», показывают удовлетворительное совпадение с ручным расчётом по СП 5.03.01-2020: расхождение по требуемой площади армирования не превышает 4 %, по прогибам – около 10 %.

2 Основной источник расхождений – различие в подходах к учёту пространственной работы плиты и нелинейных свойств железобетона. Линейный расчёт в «Лира-Сапр» с пониженным модулем упругости даёт приближённую оценку прогибов; для более точного результата необходим нелинейный расчёт с применением КЭ типа 241 и заданной арматуры.

3 Действующие в Республике Беларусь нормы СП 5.03.01-2020 и ТКП EN 1992-1-1-2009* базируются на общей методологии предельных состояний и дают близкие результаты при проектировании типовых конструкций. Различия проявляются главным образом в деталях расчётных моделей и значениях частных коэффициентов.

4 При использовании ПК «Лира-Сапр» для расчётов по нормам Республики Беларусь необходимо корректно задавать характеристики материалов (классы бетона и арматуры по белорусской классификации), коэффициенты условий работы и сочетания нагрузок в соответствии с требованиями СН 2.01.01 и ТКП EN 1990. Автоматические настройки программы, ориентированные на российские нормы (СП 63.13330), требуют адаптации.

Список литературы

1 СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Введ. 16.11.2020. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 236 с.

2 ТКП EN 1992-1-1-2009*. Проектирование железобетонных конструкций. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий. – Введ. 01.01.2010. – Минск, 2009.

3 **Тур, В. В.** Строительные правила СП 5.03.01.2020 в свете требований FIB Model Code 2020 и PREN1992 второго поколения / В. В. Тур, Н. А. Рак // Проблемы современного строительства : сб. науч. трудов, Минск, 23 мая 2023 г. / редкол. : В. В. Бондарь, В. Ф. Зверев, Е. А. Козловский. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 25–33.

УДК 624.012.45:699.8

СОВРЕМЕННЫЕ РЕМОНТНЫЕ СОСТАВЫ ДЛЯ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Н. А. СТРОГАН, Н. Д. ХОДОНОВИЧ, А. В. ШЕБУШЕВ, А. А. ВАСИЛЬЕВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Долговечность железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК) задается на стадии их проектирования и изготовления, обеспечивается при изготовлении и эксплуатации [1].

Важнейшей составляющей обеспечения необходимого остаточного ресурса железобетона является качественное и в срок, выполнение текущих и капитальных ремонтов ЖБЭ и ЖБК с восстановлением (выполнением нового) защитных слоев бетона [1].

Современные ремонтные составы должны удовлетворять комплексу требований: адгезия не менее 1,5–2,5 МПа, безусадочность, прочность на сжатие 30–80 МПа, морозостойкость не ниже F300, водонепроницаемость.

Необходимо отметить, что при ремонте горизонтальных, наклонных и потолочных поверхностей возникает риск распространения ремонтного состава за пределы повреждённого участка, что определяет необходимость повышения требований к технологичности смесей (тиксотропности для различных углов наклона поверхностей, текучести для литьевых составов).

Линейкой материалов, удовлетворяющих всем необходимым требованиями, являются тиксотропные ремонтные составы (ТРС) и литьевые ремонтные составы (ЛРС) марки «КТтрон-3». Ремонт-

ные материалы «КТтрон-3» предназначены для ремонта конструкций и сооружений, подвергающихся различным эксплуатационным нагрузкам и атмосферным воздействиям.

КТтрон-3 Р600, КТтрон-3 Т400, КТтрон-3 Т500, КТтрон-3 Л400, КТтрон-3 Л600, КТтрон-3 Т505, КТтрон-3 Л505 – сухие смеси, состоящие из различных типов цементов, минерального заполнителя, армирующего волокна и модифицирующих добавок [2].

При смешивании с водой они образует высокопрочный безусадочный быстротвердеющий тиксотропный раствор, с высокой степенью адгезии к арматуре и ремонтируемому основанию, повышающий свою пластичность при вибрировании. После отверждения смеси приобретают цементно-серый цвет [2].

Основные параметры составов марки «КТтрон-3» приведены в таблице 1.

Таблица 1 – **Параметры ремонтных составов марки «КТтрон-3»**

Наименование состава (характеристика) ——— Параметр	КТтрон-3 Р600 (ТРС)	КТтрон-3 Т400 (безусад. быстротверд. ТРС)	КТтрон-3 Т500 (ТРС)	КТтрон-3 Т505 (высокопроч. ТРС)	КТтрон-3 Л400 (литьевой РС)	КТтрон-3 Л505 (литьевой высокопроч. РС)	КТтрон-3 Л600 (литьевой высокопроч. РС)
Фракция заполнителя, не более, мм	2,5	0,63	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Фибронаполнитель	Полимерный						
Марка по подвижности	РК 120-150	РК 120-150	РК 120-150	РК 120-150	РК4 (П5)	РК4	РК4
Марка по водопроницаемости	W16	W10	W16	W16	W12	W16	W16
Марка по морозостойкости	F300	F300	F300	F300	F300	F300	F300
Прочность на сжатие (28 суток)	60	45	60	60	40	60	60
Прочность сцепления с бетоном (28 суток)	1,5	1,8	2,0	2,0	1,8	2,0	2,0
Прочность на изгиб (28 суток)	8,0	7,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Модуль упругости, МПа	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000
Эксплуатация в агрессивных средах	5 < pH < 14	–	5 < pH < 14	4 < pH < 14	5 < pH < 14	4 < pH < 14	5 < pH < 14

Области применения смесей: ремонт и восстановление бетона ЖБЭ, подверженных статическим и динамическим нагрузкам: железобетонных балок, ферм, колонн, ригелей, ребристых плит и плит пустотного настила, плит, опертых по контуру, стеновых панелей и др.; ремонт монолитных ЖБК; ремонт каменных и армокаменных конструкций; ремонт конструкций, подверженных воздействию морской воды, агрессивных сред, минеральных масел и многократному чередованию циклов замораживания-оттаивания. Кроме того – ремонт наклонных (от 0 до 45°) поверхностей (КТтрон-3 Р600); ремонт футеровок дымовых труб (КТтрон-3 Т400, КТтрон-3 Т500, КТтрон-3 Т505);

Область применения смеси КТтрон-3 Л400: ремонт бетонных элементов, ЖБЭ и ЖБК внутри помещений и на открытом воздухе, подверженных статическим и динамическим повторяющимся нагрузкам, в том числе в агрессивных средах; ремонт сооружений для очистки сточных вод и канализационных систем; ремонт парковочных зон, в том числе на открытом воздухе; цементация между стенами фундаментов и бетонными плитами пола. Для смесей КТтрон-3 Л505 и КТтрон-3 Л600 область применения аналогична, добавляется ремонт морских портовых сооружений [2].

Использование ремонтных смесей «КТтрон-3» позволяет восстановить бетон защитного слоя с необходимой (достаточной) прочностью на сжатие и адгезией к «старому» бетону, т. е. восстановить несущую способность ЖБЭ и ЖБК для обеспечения необходимого остаточного ресурса.

Список литературы

1 **Васильев, А. А.** Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона : монография / А. А. Васильев; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 215 с.

2 КТтрон – российские материалы для гидроизоляции, защиты и ремонта строительных конструкций // КТтрон. – URL: http://www.kttron.ru/goods/kttron/ (дата обращения: 10.07.2026).

УДК 624.94.692.1

ВАРИАНТ УСТРОЙСТВА ПОДВАЛЬНОГО ЭТАЖА БЕСПОДВАЛЬНОГО ЗДАНИЯ

В. А. СУРАЕВ, В. В. ТАЛЕЦКИЙ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

При реконструкции многоэтажного здания без подвального помещения может возникнуть технологическое требование установки оборудования ниже уровня пола первого этажа, т. е. в подвале.

Рассмотрим один из возможных вариантов устройства подвала в существующем каркасном здании. Каркас сборный железобетонный, колонны установлены в стаканы монолитных железобетонных отдельно стоящих фундаментов. Например, фундамент высотой 1,8 м с двумя ступенями высотой по 0,45 м и подколонником высотой 0,9 м. При сечении колонн 0,4 × 0,4 м наименьшее поперечное сечение подколонника – 0,9 × 0,9 м.

Для строительства подвала необходимо под существующими фундаментами возвести новые с обрезом ниже уровня пола подвала не менее 150 мм и передать нагрузку на них. Это возможно при возведении под каждым существующим фундаментом свайного фундамента и передаче нагрузки от колонн каркаса на них.

Первым этапом работ является бурение скважин для свай через ступени существующего фундамента рядом с подколонником, армирование и бетонирование свай. Арматурные каркасы свай должны выходить за пределы верха второй ступени на высоту будущего ростверка для связи с арматурными каркасами ростверка. Сваи располагаются с двух противоположных сторон подколонника. Длина, диаметр и количество свай определяются расчетом. Бетон свай не должен соприкасаться с бетоном существующего фундамента, поэтому перед их бетонированием необходимо в пробуренные в существующем фундаменте отверстия установить гильзы, например, из полиэтилена.

Ростверк выполняется в виде трёх балок, монолитно соединенных между собой. Одна балка проходит через подколонник, на неё передаётся нагрузка от колонны. Для её устройства бурится отверстие в подколоннике сечением, соответствующим размеру балки. Низ отверстия выше уровня верха второй ступени фундамента на 50 мм и более. Перед бурением подколонник усиливается стальными пластинами толщиной не менее 10 мм со всех сторон. Пластины крепятся к подколоннику распорными анкерами и свариваются между собой. В двух пластинах, через которые будет проходить балка, перед установкой вырезается отверстие размером, соответствующим размеру балки. Две другие балки ростверка возводятся перпендикулярно первой балке с каждой стороны подколонника. Они будут передавать нагрузку от первой балки на сваи. Между низом балок и верхней ступени фундамента должен быть зазор не менее 50 мм, для исключения взаимодействия с существующим фундаментом при передаче нагрузки (например, как показано на рисунке 1).



Рисунок 1 – Устройство ростверка под колонной над существующим фундаментом

Второй этап работ заключается в разборке ступеней существующего фундамента, откопке грунта между сваями до подошвы нижнего ростверка, устройстве нижнего ростверка (например, в виде

плиты) и связь его армирования с арматурой свай. На нижнем ростверке бетонируется промежуточная колонна, которая будет передавать нагрузку от существующего фундамента на нижний ростверк. Высота колонны – от обреза нижнего ростверка до низа подколонника существующего фундамента. Поперечное сечение колонны равно поперечному сечению подколонника. Внизу арматурные стержни колонны свариваются с арматурными стержнями, установленными в тело нижнего ростверка, вверху соединяются со стержнями подколонника (рисунок 2).



Рисунок 2 – Откопка грунта под существующим фундаментом, устройство нижнего ростверка и возведение промежуточной колонны на нижнем ростверке

На третьем этапе работ выполняют разборку верхнего ростверка и свай до обреза нижнего ростверка. Нагрузка уже передается через колонну на нижний ростверк (рисунок 3).

Четвертый этап работ – это установка опалубки для устройства монолитного перекрытия над подвалом, армирование и бетонирование его. При балочном перекрытии главные балки перекрытия будут опираться на подколонник, при безбалочном перекрытии на подколонник будет опираться непосредственно плита перекрытия (рисунок 4).



Рисунок 3 – Разборка ростверка и свай до обреза нижнего ростверка



Рисунок 4 – Устройство монолитного перекрытия над подвалом

Вывод. Рассмотренный вариант устройства подвала безподвального каркасного здания, конечно, трудоёмкий и экономически затратный, но технически наиболее реальный.

УДК 7271:721.011.12+69.059.3:691.328-422

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ШКОЛЫ

Е. А. ТАРАНОВИЧ, А. В. СТЕПАНОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Реконструкция зданий общеобразовательных школ, как правило, сопровождается необходимостью сохранения существующей несущей системы при изменении функциональных требований, нагрузок и эксплуатационных условий. Одним из наиболее ответственных этапов реконструкции является оценка технического состояния изгибаемых элементов перекрытий и покрытий. При выявлении недостаточной несущей способности, повышенных деформаций, повреждений бетона или арматуры возникает задача выбора рационального способа усиления.

Для железобетонных балок при реконструкции применяются следующие конструктивно-технологические решения: увеличение поперечного сечения с установкой дополнительной арматуры, монтаж стальных пластин или профилей, наклейка полимерных композиционных материалов, а также применение внешнего предварительного напряжения.

Цель настоящей работы – сравнительный анализ методов усиления железобетонных балок, применяемых при реконструкции здания школы, с учетом технических, технологических и экономических факторов. Особое внимание уделяется не только приросту несущей способности, но и продолжительности работ, трудоемкости, изменению геометрии элемента, массе системы усиления, необходимости применения сварочных и мокрых процессов, а также эксплуатационным ограничениям.

1 Увеличение поперечного сечения железобетонной балки.

Метод заключается в увеличении высоты или ширины существующей балки с установкой дополнительной арматуры и последующим устройством нового слоя бетона. Решение обеспечивает увеличение рабочей высоты сечения и площади армирования, что позволяет существенно повысить несущую способность и жесткость элемента. Метод хорошо сочетается с традиционными технологиями бетонных работ и может применяться при значительном дефиците несущей способности.

К недостаткам относятся значительная трудоемкость, необходимость устройства опалубки, подготовка поверхности существующего бетона, выполнение дополнительных соединений и выдерживание нового бетона. Увеличение размеров сечения может уменьшить полезную высоту помещения или изменить архитектурные параметры. Для действующей школы наличие мокрых процессов и необходимость организации зоны производства работ также могут увеличивать продолжительность реконструкции.

2 Усиление стальными пластинами или профилями.

При усилении стальными элементами на растянутую грань балки устанавливаются пластины, уголки, швеллеры или комбинированные профили, которые включаются в совместную работу с существующим элементом. Для передачи усилий применяются анкеры, болтовые соединения, сварные соединения или специальные крепежные системы в зависимости от принятого конструктивного решения и состояния существующей конструкции.

Основным преимуществом является возможность получить требуемое увеличение несущей способности без существенного увеличения габаритов железобетонной балки. Недостатками являются сравнительно высокая масса стали, необходимость защиты от коррозии, трудоемкость монтажа и, в случае применения сварки, необходимость организации огневых работ. Для здания школы последний фактор может существенно влиять на организацию безопасного производства работ.

3 Усиление полимерными композиционными материалами.

Современным вариантом является наружное армирование балки углеродными полимерными композиционными материалами (углепластиком, CFRP) в виде ламелей или тканей. При усилении на изгиб ламели обычно располагают вдоль растянутой зоны, а ткани могут применяться для усиления при действии поперечной силы и формирования U-образных систем. Исследования показывают, что FRP-системы способны повышать несущую способность, жесткость и эксплуатационные характеристики железобетонных балок, при этом обладают высокой удельной прочностью и малой массой [2–4].

К технологическим преимуществам относятся небольшая масса элементов усиления, отсутствие

значительного изменения геометрии балки и относительно высокая скорость монтажа. Вместе с тем эффективность системы существенно зависит от состояния бетонного основания и качества клеевого соединения. В литературе среди характерных проблем отмечаются преждевременное отслоение композита от бетона, чувствительность клеевой системы к условиям применения и необходимость защиты от воздействия высоких температур [2, 3].

4 Усиление внешним предварительным напряжением.

Метод предусматривает устройство внешних напрягаемых элементов, например, стержней, канатов или шпренгельных систем, которые создают в балке усилия, частично компенсирующие действие эксплуатационных нагрузок. Такое решение может быть эффективно при значительном дефиците несущей способности и необходимости регулирования напряженно-деформированного состояния. Для железобетонных балок при усилении внешними напрягаемыми элементами требуется учитывать потери предварительного напряжения и работу узлов анкеровки.

К недостаткам относятся повышенная сложность расчета и монтажа, необходимость надежной анкеровки, контроль усилия натяжения и более высокая квалификация персонала. Поэтому данный способ целесообразно рассматривать прежде всего для случаев, когда более простые методы не обеспечивают требуемого результата либо приводят к чрезмерному увеличению материалоемкости.

Таблица 1 – **Сравнение методов усиления железобетонных балок**

Показатель	Увеличение сечения	Стальные элементы	CFRP	Внешнее напряжение	Комментарий
Увеличение несущей способности	Высокое	Высокое	Среднее – высокое	Высокое	Определяется расчетом
Изменение габаритов	Значительное	Небольшое	Минимальное	Небольшое	Важно для помещений школы
Масса усиления	Высокая	Высокая	Очень малая	Малая – средняя	Влияет на дополнительные нагрузки
Трудоемкость	Высокая	Средняя	Низкая – средняя	Высокая	Зависит от состояния основания
Срок монтажа	Длительный	Средний	Короткий	Средний– длительный	С учетом подготовительных работ
Коррозионная стойкость	Зависит от защиты	Требует защиты	Высокая	Зависит от материала	Особенно важно при увлажнении
Огневые работы	Нет	Возможны	Нет	Нет/ограниченно	Влияют на безопасность школы

При технико-экономическом сравнении необходимо учитывать полный комплекс затрат: материалы, труд рабочих, механизмы и оборудование, подготовку основания, временные опоры, защитные покрытия, транспортировку, контроль качества и восстановительные работы.

Для выбора варианта усиления предлагается использовать приведенные затраты на единицу усиленной конструкции либо на весь объем работ по реконструируемому участку. При этом стоимость должна определяться не только прямыми затратами, но и учитывать технологические последствия выбранного решения. Для здания школы важным экономическим показателем является продолжительность вывода помещений из эксплуатации. Поэтому два технически равноценных варианта могут иметь различную итоговую эффективность из-за разницы в сроках выполнения работ и объеме организационных мероприятий. В технико-экономическое сравнение целесообразно включать также продолжительность монтажа, количество технологических операций, необходимость временного усиления и возможность выполнения работ без полного закрытия здания.

Анализ показывает, что универсального способа усиления железобетонных балок для условий реконструкции школы не существует. Увеличение сечения отличается конструктивной понятностью и возможностью получения значительного прироста несущей способности, однако сопровождается существенным объемом бетонных работ. Стальные элементы позволяют выполнять усиление при ограниченном изменении геометрии, но требуют решения вопросов защиты металла и организации монтажа. Композитные системы отличаются малой массой и минимальным влиянием на размеры балки, однако требуют тщательной подготовки бетонного основания и контроля клеевого соединения. Внешнее предварительное напряжение предоставляет дополнительные возможности регулирования работы конструкции, но является технологически и расчетно более сложным решением.

Следовательно, технико-экономический выбор следует выполнять по результатам единого рас-

четного цикла: обследование существующей балки – определение дефицита несущей способности – разработка нескольких вариантов усиления – расчет каждого варианта – определение материальных и трудовых затрат – сравнение продолжительности работ и эксплуатационных ограничений. Такой подход позволяет исключить необоснованное усиление и выбрать конструктивное решение, обеспечивающее требуемую надежность при минимально необходимом объеме работ.

УДК 666.982.2:658.5

ЭКОНОМИЯ РЕСУРСОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. Г. ТАШКИНОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Ресурсосбережение является важным условием повышения конкурентоспособности национальной экономики за счет рационального использования сырья и энергии, снижения издержек производства. В строительном комплексе Республики Беларусь главными задачами ресурсосбережения являются:

– сохранение ограниченных собственных природных ресурсов страны;

– снижение затрат на энергоресурсы;

– снижение материалоемкости продукции;

– повышение качества материалов и конструкций за счет применения инновационных технологий.

При производстве бетонных и железобетонных конструкций в заводских условиях ресурсосбережение включает:

– использование вторичного сырья (вторичный щебень из дробленого бетона);

– применение эффективных химических добавок – ускорителей твердения;

– экономия сырья (цемента, арматуры и заполнителей);

– энергосберегающие режимы тепловой обработки (термосные и беспрогревные режимы);

– совершенствование конструкции тепловых установок для ускоренного твердения бетонных изделий и организация их рационального пароснабжения.

Вторичный щебень получают на специальных дробильных установках (в том числе и мобильных, устанавливаемых непосредственно на строящемся объекте) путем переработки боя бетонных изделий и керамического кирпича, остатков от сноса зданий. В процессе переработки воздушной или магнитной сепарацией из щебня удаляют загрязнения и рассеивают на фракции с помощью вибросит (грохота). В зависимости от содержания кирпича (до 5 % или до 30 %), вторичный щебень относят к 1-му или 2-му классу. Вторичный щебень 1-го класса применяют для изготовления бетонов низких марок (5–20 МПа), 2-го класса – для дорожного строительства, благоустройства, подготовки оснований под фундаменты.

Химические добавки-ускорители твердения позволяют повысить производительность заводов по производству сборного железобетона, увеличить оборачиваемость форм, экономить расход энергии при тепловой обработке изделий и цемент за счет увеличения темпов твердения бетона. Одновременно сокращается производственная площадь, необходимая для выдерживания отформованных изделий. Широко применяются отечественные комплексные добавки (суперпластификатор + ускоритель твердения): Реламикс тип 2, Реламикс ПК, Полипласт ПК-В, Стахемент FЖ 35, Универсал-П-2, позволяющие экономить до 15–20 % цемента.

Уменьшить расход вяжущего можно, применяя цементы с низким значением НГЦТ (до 25 %), заполнители оптимального зернового состава с минимальным содержанием глинистых и пылевидных фракций. С этой же целью целесообразно использовать рост прочности бетона во времени с учетом реальных сроков строительства и загрузки конструкций эксплуатационной нагрузкой, применять бетонные смеси с минимально допустимой удобоукладываемостью и практиковать повторное вибрирование изделий в стендовой технологии.

Для экономии арматурной стали возможно использование комбинированного армирования (с разными видами армирующих материалов):

– стержни в сочетании с фиброй (стальной, стеклянной или полипропиленовой) по всему объе-

му изделия;

– с частичной заменой стержней на композитную арматуру (стеклопластиковую или базальтовую) в малонагруженных зонах конструкций.

Завершающим этапом технологического процесса изготовления сборных бетонных и железобетонных изделий (ЖБИ) является тепловая обработка (ТО). Важность тепловой обработки обусловлена тем, что это самый длительный и энергоемкий процесс в производстве ЖБИ, на долю которого приходится 70–80 % общих затрат времени и тепловой энергии. Ее разновидность – тепловлажностная обработка (ТВО), сохраняет влагу в материале и создает благоприятные условия для гидратации цемента и формирования структуры бетона. На заводах ЖБИ ТВО осуществляется в пропарочных камерах периодического и непрерывного действия. Наиболее распространенным типом тепловых установок периодического действия являются ямные пропарочные камеры. Недостатком ямных камер является большая тепловая емкость ограждающих конструкций – стенок, днища и крышки, которая в несколько раз превышает тепловую емкость пропариваемых изделий. Вследствие периодического характера работы камер, тепло, аккумулируемое ограждениями, безвозвратно теряется при перерывах в работе для выгрузки пропаренных и загрузки свежеотформованных изделий. Уменьшить тепловую инерцию ограждений можно размещением на них дополнительного теплоизоляционного слоя со стороны внутреннего объема камеры. При этом также снижаются теплопотери в окружающую среду из-за увеличения термического сопротивления ограждений.

Наиболее простым решением по повышению эффективности ямных камер является замена в ограждающих конструкциях тяжелого бетона на легкий с пористыми заполнителями (керамзитобетон). Однако подобные камеры имеют коэффициент полезного использования тепла (отношение полезно используемого тепла к его суммарному расходу) около 50 % вследствие невысоких теплотехнических характеристик керамзитобетона. Удельный расход пара на ТВО бетонных изделий в камерах с такими ограждениями из керамзитобетона, составляет 200–250 кг/м³ (460–570 МДж/м³).

Использование для утепления ограждений камер более эффективных теплоизоляционных материалов: минваты, блочного пеностекла, термостойких (до 100 °С) пенопластов, требует их надежной защиты как от увлажнения паровоздушной средой и конденсатом, так и от возможных ударов стальных форм при загрузке и выгрузке изделий. Такие условия может обеспечить 3-слойное стеновое ограждение из защитного железобетонного слоя, пароизоляции, утеплителя и наружного несущего слоя из легкого бетона.

Ранее полученные экспериментальные данные [1] показывают, что достаточной прочностью для восприятия возможных эксплуатационных ударных воздействий от стальных форм и температурно-влажностных напряжений обладает внутренний (со стороны пропарочной камеры) защитный слой из армированного тяжелого бетона класса не ниже В20 толщиной 50 мм. Нагрузку от веса крышки и самой стенки, воспринимает наружный слой ограждения, который рекомендуется выполнять толщиной 100 мм из армированного керамзитобетона класса не ниже В10.

Методом конечных разностей для нестационарных условий теплопередачи выполнялся теплотехнический расчет ограждений, затем составлялось уравнение теплового баланса ямной камеры, включающее: теплоту для нагрева изделий и форм, ограждений ямной камеры, теплопотери в окружающую среду через ограждения, теплоту на испарение влаги затворения и на нагрев среды в камере. В приходной части теплового баланса учитывалась теплота, выделяющаяся в процессе экзотермических реакций гидратации цемента. Расчетное значение коэффициента полезного использования тепла составило 70–75 %. При этом удельный расход пара в камере с 3-слойными ограждениями составляет 135–150 кг/м³ (310–350 МДж/м³).

Результаты натурных испытаний экспериментальной пропарочной камеры с 3-слойными ограждениями на полигоне завода КПД Гомельского ДСК подтвердили данные расчетов [2].

Дополнительная экономия достигается при замене периода изотермической выдержки с подачей пара на термосное остывание. Как показывают опытные данные, скорость остывания камеры составляет при этом 0,8–2,2 °С в час, в зависимости от коэффициента заполнения установки. Чем он больше, тем больше тепла аккумулирует бетон пропариваемых изделий и, следовательно, остывание будет происходить медленнее. При таком режиме, когда пар подается в камеру только в период подъема температуры, расход пара снижается еще на 20–30 %. Похожий эффект дает применений режимов с пониженными температурами нагрева, когда заданную прочность бетон набирает за более длительный срок. Дальнейшее повышение экономичности и надежности работы установок для

ТВО может быть достигнуто при использовании материалов, совмещающих функции тепло- и гидроизоляции.

Список литературы

1 **Ташкинов, А. Г.** Исследования стеновых ограждений пропарочных камер для ускоренного твердения бетона / А. Г. Ташкинов, В. А. Радченко // Актуальные проблемы развития транспортных систем и строительного комплекса : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2001. – С. 411–412.

2 **Ташкинов, А. Г.** Исследование стеновых ограждений в условиях повышенной температуры и влажности / А. Г. Ташкинов // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году качества, Гомель 21–22 нояб. 2024 г. : в 2 ч./ под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2024. – Ч. 2. – С. 37–39.

УДК 614.8

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С ГОРЮЧИМИ УТЕПЛИТЕЛЯМИ

В. Ф. ТИМОШКОВ
Филиал «Институт профессионального образования» Университета гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, г. Гомель

Обеспечение пожарной безопасности при строительстве зданий и сооружений включает в себя соблюдение нормативных требований к материалам, создание противопожарных разрывов, размещение первичных средств пожаротушения (щиты, огнетушители), обеспечение эвакуационных путей и схем, монтаж систем пожарной сигнализации и водопровода, а также проведение противопожарных инструктажей для всех работников. Важно также соблюдать правила безопасного хранения горючих материалов, проводить работы с открытым огнем только при наличии разрешения и исправного оборудования, а также поддерживать чистоту на строительной площадке. При строительстве зданий и сооружений из металлических конструкций с горючими утеплителями вероятно возникновение следующих рисков, влияющих на пожарную безопасность объекта:

– быстрое и скрытое распространение огня по полимерному утеплению внутри стеновых и кровельных панелей;

– образование новых очагов пожара внутри здания от горящего плава полимерного утеплителя и битума;

– деформация, обрушение покрытия и других незащищенных металлических конструктивных элементов.

В случае возникновения возгораний, при строительстве данных объектов, необходимо уделить особое внимание сразу нескольким направлениям и подавать средства пожаротушения в нижеперечисленной последовательности:

– внутрь здания – для охлаждения несущих конструкций покрытия, кровельных панелей и внутренней поверхности стеновых панелей, а также на тушение очагов внутри здания и на защиту материальных ценностей;

– на покрытие здания – для тушения и предотвращения распространения огня по всей площади с одновременным устройством проемов для удаления дыма и снижения температуры, а также вскрытием кровельного ковра и устройством разрывов в утеплителе;

– на наружную поверхность стен – для охлаждения и тушения стеновых панелей с одновременным вскрытием конструкций и устройством разрывов.

Руководитель тушения пожара при ликвидации возгорания в строящихся зданиях из металлических конструкций в сочетании с горючими полимерными утеплителями, во взаимодействии с персоналом объекта, обеспечивает выполнение следующих боевых действий по локализации и ликвидации кризисных и экстремальных ситуаций:

– пожаротушение на покрытии проводится ручными перекрывными пожарными стволами и стволами с большим расходом огнетушащих веществ в зависимости от обстановки;

– охлаждение несущих конструкций покрытия, кровельных панелей и внутренней поверхности

стеновых панелей осуществляется с помощью лафетных стволов, а также ручными пожарными стволами с большим расходом огнетушащих веществ;

– пожаротушение очагов и защиту материальных ценностей внутри здания организовывать с применением распыленной струи воды из ручных перекрывных стволов;

– при тушении стеновых панелей использовать ручные стволы с большим расходом огнетушащих веществ;

– учитывать возможность перехода огня в смежные секции и отсеки через пояса в ограждающих конструкциях, противопожарные стены и перегородки;

– использовать тепловизоры (при наличии на пожарной аварийно-спасательной технике, сосредоточенной на месте пожара) для определения границ горения и скрытых очагов;

– ограничивать распространение пожара путем вскрытия и разборки строительных конструкций и создания противопожарных разрывов;

– в качестве опорных рубежей при тушении пожара на покрытии использовать светоаэрационные фонари, вентиляционные каналы;

– по окончании тушения пожара тщательно проверить стеновые и кровельные панели с целью ликвидации очагов горения;

– организовать контроль за состоянием несущих конструкций и принимать меры по их защите от возможных повреждений.

Подводя итог, необходимо отметить то, что обеспечение пожарной безопасности при строительстве зданий, сооружений из металлических конструкций в сочетании с горючими полимерными утеплителями включает в себя не только соблюдение нормативных требований, но и определение возможных рисков и способов их устранения в кратчайшие сроки. Смоделировать возможные сценарии возникновения и ликвидации пожаров на данных объектах возможно при проведении тактико-специальных учений в гарнизонах МЧС. На основании увиденного, при подведении итогов учений возможно принятие соответствующих решений с заинтересованными специалистами строительной отрасли по обеспечению требований пожарной безопасности. Это показывает возможность совершенствования профилактической работы, способов пожаротушения во время строительства зданий и сооружений из металлических конструкций в сочетании с горючими полимерными утеплителями, а также исключения гибели людей, снижения материального ущерба и обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений на различных стадиях их жизненного цикла.

Список литературы

1 Об утверждении Боевого устава органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь по организации тушения пожаров : приказ М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь от 3 янв. 2024 г. № 1 // ilex : информ. правовая система (дата обращения 03.09.2026).

2 **Теребнев, В. В.** Пожарная тактика. Основы тушения пожара / В. А. Теребнев, А. В. Подгрушный. – Екатеринбург : Калан, 2008. – 512 с.

3 **Тимошков, В. Ф.** Аподиктический предел огнестойкости конструкции – определяющий фактор успешного пожаротушения / В. Ф. Тимошков // Проблемы обеспечения безопасности людей при пожаре и взрыве : сб. материалов IV Междунар. заоч. науч.-практ. конф., Минск, 22 дек. 2017 г. – Минск : УГЗ МЧС Беларуси, 2017. – 223 с.

4 **Тимошков, В. Ф.** Особенности пожаротушения в пределах технической территории промышленного объекта / В. Ф. Тимошков // Пожарная и аварийная безопасность : сб. материалов XIII междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году культуры безопасности – Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. – 587 с.

УДК 625.712.34

АРХИТЕКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ПЕШЕХОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Т. С. ТИТКОВА, А. В. ЩЕГЛОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Подземные пешеходные переходы – искусственные сооружения под проезжей частью, предназначенные для движения пешеходов на другую сторону улицы или дороги [1]. Они давно стали неотъемлемым элементом инфраструктуры крупных городов. Основное предназначение таких сооружений – обеспечение безопасного и беспрепятственного пересечения проезжей части, позволя-

ющее полностью разделить транспортные и пешеходные потоки в разных уровнях. Это решение практически исключает риск наезда на пешеходов на магистральных улицах с интенсивным движением и одновременно повышает пропускную способность дорог за счёт ликвидации наземных светофорных регулирований. Помимо прямой транспортной функции, подземные переходы выполняют роль элементов городского комфорта: они защищают пешеходов от неблагоприятных погодных условий и снижают акустическое воздействие уличного шума. В крупных мегаполисах переходы нередко интегрируются в более сложную инфраструктуру – соединяются с вестибюлями метро, подземными паркингами и торговыми галереями, формируя многоуровневые пешеходные узлы, которые разгружают прилегающие территории и повышают связность городских районов.

Однако вопрос безопасности подземных пешеходных переходов не имеет однозначной трактовки в научной литературе и вызывает дискуссии, в которых представлены как положительные, так и отрицательные оценки.

Сторонники подземных переходов отмечают их фундаментальное преимущество – разделение пешеходных и транспортных потоков в разных уровнях, что теоретически снижает риск конфликтных ситуаций на проезжей части. Так, в исследовании, посвященном Гонконгу (Zhu, Mannan, Sze, Newman и др.), авторы приходят к выводу, что переходы разных уровней, включая подземные, могут повысить безопасность пешеходов при условии их продуманной интеграции в пешеходную сеть [2].

Однако существуют работы, представляющие диаметрально противоположные результаты. К примеру, В. А. Величко на основе анализа дорожно-транспортных происшествий в Москве за 2019–2023 гг. установил, что подземные пешеходные переходы в среднем опаснее наземных в 2,46 раза, а по происшествиям с погибшими – в 5,9 раза [3]. Автор связывает это с водительским фактором (неожиданность появления пешеходов) и поведенческими барьерами для пешеходов – нежеланием тратить время и силы на лестницы, а также физическими сложностями для людей с ограничениями или с тяжелыми предметами. В исследованиях пожарной безопасности подземных переходов А. Г. Фирсов, В. И. Сибирко и М. В. Загуменнова акцентируют внимание на рисках, связанных с ограниченными возможностями эвакуации при чрезвычайных ситуациях.

В настоящей работе безопасность подземных переходов рассматривается сквозь призму архитектурных аспектов – параметров, определяющих восприятие пространства пользователем и, как следствие, его поведение. Именно архитектурные решения формируют ту среду, которая либо побуждает пешехода пользоваться переходом, либо, напротив, провоцирует рискованное поведение.

Рассмотрим архитектурные аспекты безопасности подземных пешеходных переходов.

Учет градостроительной ситуации. В пространственно-планировочном каркасе города безопасность подземных пешеходных переходов напрямую зависит от анализа градостроительной ситуации. Архитектурно-композиционное решение таких объектов должно интегрироваться в существующую застройку с учетом основных людских потоков, движения наземного транспорта и размещения транспортно-пересадочных узлов. Просматриваемость пешеходных переходов в городском пространстве позволяет минимизировать криминогенные риски за счет естественного визуального контроля со стороны улицы.

Объемно-планировочные решения. Ключевым требованием к тоннельной части подземных переходов является обеспечение ее прямолинейности для исключения «слепых» зон и обеспечения низкого уровня психологического беспокойства пешеходов. Габариты поперечного перехода рассчитываются с учетом людских потоков в час пик для предотвращения эффекта «бутылочного горлышка» и создания условий для беспрепятственной эвакуации.

Согласно строительным нормам, одна полоса для движения должна быть шириной не менее 1 метра. Пропускная способность такой полосы составляет 2000 чел./ч, пандуса – 1750 чел./ч, а лестницы – 1500 чел./ч. Ширина самого узкого перехода составляет не менее 3 м. Если в переходе предусматриваются места для инвалидных колясок, то ширина делается с учётом их проезда. Высота прохода на лестницах и пандусах должна быть не менее 2,3 м (при капитальном ремонте допускается 2,1 м). Продольный уклон назначается от 5 до 40 ‰ для водоотвода; при невозможности – поперечный уклон от 2 до 5 ‰ с водоотводным лотком [4].

Визуальная доступность и навигация. Для подземных пешеходных переходов предусматривается комплексная архитектурно-информационная система, которая включает контрастную маркировку покрытий, тактильные указатели для слабовидящих, продуманное освещение ключевых зон и понятные информационные щиты. Система обеспечивает интуитивно понятную ориентацию и без-

опасное движение всех категорий пешеходов в подземном пространстве.

Эргономические параметры. Строгие требования предъявляются к лестницам и пандусам, которые должны оборудоваться двойными поручнями с двух сторон на высоте 0,7 и 0,9 м. Длина поручней должна превышать длину марша не менее чем на 0,3 м с каждой стороны, а их концы загибаются вниз для безопасного завершения движения. Поручни должны иметь круглое сечение диаметром от 0,03 до 0,05 м, обеспечивающее удобный и надежный захват, а их конструкция должна быть непрерывной и строго параллельной поверхности пандуса. Рекомендуется обустройство пассажирских лифтов или подъемных платформ с вертикальным перемещением.

Освещение. Эффективность освещения зависит не только от соблюдения количественных показателей (средняя горизонтальная освещенность на уровне 75 лк для проходов и 40 лк для лестниц и пандусов), но и от качественных характеристик – цветовой температуры (рекомендуемый диапазон 4428–6250 K), отражающих свойств материалов отделки и объемно-планировочных решений, что в совокупности определяет, будет ли переход восприниматься пользователем как безопасное пространство или, напротив, как потенциально опасная зона.

Материалы. Выбор материалов в подземных пешеходных переходах играет ключевую роль в обеспечении безопасности на всех уровнях – от пожарной защиты до предотвращения травматизма. В соответствии с нормативными требованиями, конструкции и отделка должны выполняться из негорючих материалов, а для облицовки применяются композитные материалы с параметрами горючести «НГ», что критически важно для сдерживания распространения огня и обеспечения безопасной эвакуации в замкнутом пространстве.

Заключение. Подземные пешеходные переходы являются важным элементом транспортной инфраструктуры крупных городов, обеспечивая безопасное разделение пешеходных и транспортных потоков, повышая пропускную способность дорог и создавая дополнительный комфорт для горожан. Однако их безопасность не является однозначной и зависит не только от инженерных решений, но и от комплекса **архитектурных факторов**, влияющих на восприятие пространства пользователями и их поведение. Для Гомеля, где функционирует семь подземных переходов в зонах оживлённого движения, учёт перечисленных архитектурных аспектов приобретает особую практическую значимость. Дальнейшее совершенствование проектных решений, модернизация существующих объектов и учёт поведенческих факторов могут существенно повысить безопасность и привлекательность подземных переходов, снизив риски как для пешеходов, так и для водителей.

Таким образом, безопасность подземных пешеходных переходов – это комплексная проблема, требующая междисциплинарного подхода, где архитектурные решения играют центральную роль в формировании комфортной, доступной и защищённой городской среды.

Список литературы

1 Строительство. Основные термины и определения : СП 1.01.01-2024. – Введ. 01.01.2025. – Минск, 2024. – 44 с.

2 Улучшают ли пешеходные мосты и подземные переходы безопасность пешеходов? Исследование в Гонконге с использованием трехмерной цифровой карты пешеходной сети. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001457523001112 (дата обращения: 07.09.2026).

3 **Величко, В.** Сравнение безопасности наземных и подземных пешеходных переходов на примере города Москвы / В. Величко // Городские исследования и практики. – 2024. – Т. 9, № 3. – С. 67–77. – DOI: 10.17323/usp93202467-77. – EDN SQDSBJ.

4 Улицы населенных пунктов : СН 3.03.06-2022. – Введ. 24.08.2022. – Минск, 2022. – 56 с.

УДК 691.328

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ КОРРОЗИИ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ В ЖЕЛЕЗОБЕТОНЕ

М. И. ТКАЧЕВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Получение зависимости скорости коррозии стальной арматуры в железобетоне является одним из ключевых параметров при оценке технического состояния эксплуатируемого или проектируемого объекта. Рассмотрим несколько зависимостей, позволяющих прогнозировать скорость коррозии арматуры, как для обследуемых объектов, так и для проектируемых.

Так, в исследовании [1] ключевыми параметрами, по которым можно определить скорость коррозии стальной арматуры, являются толщина защитного слоя бетона, водоцементное отношение и содержание хлорида натрия. Выражение имеет два вида в зависимости от водоцементного отношения обследуемого элемента:

– при водоцементном отношении бетона 50 % ≤ В/Ц ≤ 55 %:

$$q = 0,0926e^{((0,2085\text{В/Ц}-7,7754)\text{NaCl})} \cdot \sqrt{\frac{1}{C}}, \quad (1)$$

где q – скорость коррозии арматуры, %/год; C – толщина защитного слоя бетона, мм; NaCl – содержание хлорида натрия, в процентной массе от песка; В/Ц – водоцементное отношение, %.

– при водоцементном отношении бетона 55 % < В/Ц ≤ 65 %:

$$q = 0,0926e^{((0,0387\text{В/Ц}+1,5733)\text{NaCl})} \cdot \sqrt{\frac{1}{C}}. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) требуют проведения дополнительных анализов обследуемого железобетонного элемента для определения количества содержания хлоридов натрия в бетоне и подходят для оценки конкретного объекта.

Широкое распространение получил метод поляризационного сопротивления, в основе которого лежит принцип Штерна – Гири [2]. Он связывает плотность коррозионного тока с плотностью тока, которую пропускает поверхность металла от внешнего источника тока:

$$i_k = \frac{\Delta i}{\Delta E} \cdot \frac{b_a b_k}{2,3(b_a + b_k)}, \quad (3)$$

где i_k – плотность тока коррозии арматуры, А/см^2; Δi – анодная или катодная плотность тока, которая возникает при смещении потенциала ΔE на 10–20 мВ, А/см^2; b_a и b_k – коэффициенты уравнения Тафеля, показывающие наклон участка анодной и катодной поляризационной соответственно, мВ.

Расчет скорости коррозии арматуры проводится путем перевода полученной плотности коррозионного тока в скорость потери металла:

$$q = \frac{i_k K E_M}{d}, \quad (4)$$

где q – скорость коррозии арматуры, мм/год; E_M – эквивалентная масса металла, г/моль; K – константа для перевода единиц в мм/год (принимается 3272); d – плотность металла, г/см^3.

Данный метод удобен неразрушающим способом исполнения, но при этом имеет ряд трудностей. Плотность тока в формуле (3) имеет жесткую привязку к равномерности покрытия коррозией стального стержня, однако в реальности коррозионные повреждения чаще всего имеют локальный характер, поэтому могут возникнуть сложности с определением корректных исходных данных для выполнения расчета. Определение коэффициентов уравнения Тафеля также может быть ошибочно из-за процессов, протекающих в железобетоне (избыточная влажность и т. д.).

При выполнении обследования конкретного железобетонного элемента с множественными трещинами в зоне арматуры скорость коррозионных процессов определяется на основе взаимосвязи параметров «ширина раскрытия трещины» – «скорость коррозии арматуры» [3].

Скорость коррозии стальной арматуры определяется следующим образом:

$$q = aw + b, \quad (5)$$

где q – скорость коррозии арматуры, мм/год; w – ширина раскрытия трещины, мм; a и b – коэффициенты, определяемые на основе отношения толщины защитного слоя бетона к диаметру арматурного стрежня в зоне трещины.

В данном методе отношение диаметра арматуры к толщине защитного слоя (C/D) имеет фиксированные величины (0,76; 0,78; 0,86 и 0,84), на основе которых определяются необходимые коэффициенты. Если же отношение C/D обследуемого элемента не совпадает ни с одним из указанных значений, то необходимые коэффициенты получают путем интерполяции между соседними значениями.

Выражение (5) не применимо при ширине раскрытия трещины более 3 мм, а также при отслаивании защитного слоя бетона или наличии оголённой арматуры. Методика определения скорости коррозии стальной арматуры также сдержит ряд понижающих коэффициентов, учитывающих возможность вытекания продуктов коррозии из трещин (например, при подверженности элемента атмосферным осадкам). В случае продолжительного нахождения железобетона в сухой зоне значение

понижающих коэффициентов больше, т. к. вытекание ржавчины трудоемко, в случае контакта с жидкой средой – ниже, т. к. вода легко вымывает продукты коррозии из трещин.

Модель прогнозирования долговечности железобетонных элементов, приведенная в [4], предлагает определять скорость коррозии стальной арматуры на основе особенности условий эксплуатации, а также коррозионного состояния:

$$q_{corr} = q_{corr,a} \frac{N_W}{365}, \quad (6)$$

где q_{corr} – скорость коррозии арматуры, мм/год; $q_{corr,a}$ – средняя коррозия арматуры, мм/год (определяется на основе условий среды); N_w – число дней в году, когда осадки превышают показатель 2,5 мм.

Выражение (6) предлагает рассчитывать скорость коррозии стальной арматуры исключительно на основе погодных условий (открытый воздух, помещение, переменная влажность, в зоне морской воды и зоне периодического смачивания), игнорируя важнейший параметр – особенности проектного решения (толщина защитного слоя бетона и его класс по прочности на сжатие).

Рассмотренные методы определения скорости коррозии стальной арматуры в железобетонных элементах имеют ограничения в разных областях. Так, выражения (1)–(5) подходят только для эксплуатируемых элементов, требуют проведения дополнительных исследований непосредственно на объекте, описывают только конкретный объект и не подходят для оценки на стадии проектирования. Выражение (6) не требует проведения дополнительных измерений, но не учитывает конструктивные особенности проектируемого объекта.

Список литературы

1 **Matsubayashi, Y.** Outdoor exposure test on the rate of corrosion of reinforcing bar in concrete containing chloride ion / Y. Matsubayashi, Y. Masuda, Y. Sasabuchi // Journal of Structural and Construction Engineering. – 2000. – Vol. 65, № 536. – P. 9–15.

2 Corrosion monitoring at the interface using sensors and advanced / V. Rajendran, A. Prathuru, C. Fernandez, N. H. Faisal // Corrosion Engineering, Science and Technology : sensing materials: methods, challenges and opportunities. – 2023. – Vol. 58, № 3. – P. 281–321.

3 **Wu, F.** Calculation of corrosion rate for reinforced concrete beams based on corrosive crack width / F. Wu, J. H. Gong, Z. Zhang // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering). – 2014. – Vol. 15, № 3. – P. 197–207.

4 **Бородай, Д. И.** Модель прогноза долговечности железобетонных пролетных строений автодорожных мостов / Д. И. Бородай // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2010. – № 33. – С. 43–48.

УДК 699.844

ЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ. ПЕРЕХОД ОТ ОДНОСЛОЙНЫХ СИСТЕМ К МНОГОСЛОЙНЫМ

Я. В. ТОКАРЕНКО, В. М. ПРАСОЛ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В настоящее время одной из главных задач в строительстве зданий является снижение шума в помещениях и увеличение звукоизоляции их ограждающих конструкций.

Звукоизоляция – снижение уровня шума, проникающего в помещения извне. Достигается за счет уменьшения и поглощения шума [1].

Для улучшения звукоизоляции строящихся зданий необходимо повысить качество конструктивных решений внутренних стен и междуэтажных перекрытий, а также ввести практику проверки звукоизоляционных качеств внутренних ограждающих конструкций на отдельных фрагментах, до их массового устройства на объекте [2].

В представленной статье будет раскрыта цель перехода от однослойных систем к многослойным и подход осуществления данного перехода.

Цель перехода ограждающих конструкций от однослойных к многослойным системам в звукоизоляции обусловлена необходимостью повышения акустического комфорта зданий без существенного увеличения их массы и толщины. При проектировании здания учитывают материалы, из

которых будут строиться стены и перегородки, а также количество слоев будущих стен.

1 Традиционный подход, основанный на «законе массы», предполагает, что для двукратного снижения уровня проходящего звука (на 6 дБ) необходимо увеличить поверхностную плотность однослойной преграды (например, монолитного бетона или кирпичной стены) в два раза. К примеру, если увеличить толщину кирпичной стены, то индекс ΔRw (показатель дополнительной изоляции воздушного шума в децибелах) повысится не более чем на 6 дБ, при этом нагрузка на основание будет возрастать в два раза.

В современных условиях высотного и индустриального строительства постоянное увеличение массы конструкций становится экономически нецелесообразным, так как это ведет к перерасходу материалов, увеличению нагрузки на фундамент и увеличению стоимости проекта.

2 Многослойные наружные стены представляют собой конструктивное решение, включающее в себя несущий слой (обычно это кирпичи, железобетон или газосиликатные блоки), теплоизоляционный материал (минеральную вату, пенополистирол или РЖ-плиты) и наружный защитно-декоративный слой (облицовочный кирпич, керамогранит, металлические кассеты, фиброцементные или композитные панели) [4].

При устройстве двойных перегородок из легкобетонных панелей толщина воздушной прослойки должна быть не менее 4 см [3].

Чтобы увеличить звукоизоляцию данных перегородок, воздушную прослойку необходимо заполнить звукопоглощающим материалом, таким как пористый и волокнистый материалы (базальтовая вата, минеральная вата, стекловата), которые поглощают энергию колебаний и рассеивают ее в виде тепла внутри структуры материала.

3 Для увеличения показателя звукоизоляции однослойными стенами и перегородками следует применять бескаркасные звукоизолирующие панельные системы или обшивки гипсокартонных листов, древесноволокнистые, цементно-стружечные плиты по каркасу толщиной не менее 4 см с заполнением каркаса звукопоглощающим материалом [3].

Эффективность многослойной изоляции значительно выше: правильно спроектированная каркасно-обшивная перегородка небольшой толщины способна обеспечить показатели звукоизоляции, сопоставимые со сплошной кирпичной стеной, имеющей вес в несколько раз больше.

Основные достоинства использования многослойных наружных стен по сравнению с однослойными заключаются в их высокой энергоэффективности, небольшой толщине и массе, высокой степени огнестойкости, возможности ведения строительно-монтажных работ без ограничений по сезонности [4]. Основными недостатками, с которыми сталкивается строительная отрасль при переходе на многослойные системы, являются:

1 Сложность проектирования и расчета. Акустическое поведение многослойных систем нелинейно. Наличие резонансных явлений (например, волнового совпадения или критических частот каркаса) требует применения специализированного ПО и привлечения квалифицированных инженеров-акустиков.

2 Повышенные требования к качеству монтажа. Эффективность многослойной звукоизоляции резко снижается при наличии «звуковых мостиков» (жестких связей между слоями). Неправильный подбор крепежа, отсутствие виброизоляционных лент или неплотное прилегание плит обесценивают преимущества системы.

3 Повышенные требования к квалификации рабочих. Монтаж современных акустических систем требует строгого соблюдения технологических схем и инструкций и производственной дисциплины, что часто вступает в противоречие с практикой привлечения неквалифицированной рабочей силы на строительных площадках.

4 Высокая себестоимость конструкции.

Таким образом, переход к многослойным звукоизоляционным системам является неизбежным шагом на пути к оптимизации материалоемкости и повышению энергоэффективности современных зданий. Однако его успешная реализация требует комплексного подхода, сочетающего в себе внедрение новых материалов, строгий контроль технологических процессов на строительной площадке и актуализацию нормативной базы.

Список литературы

1 **Деркач, Н. В.** Сущность звукоизоляции и способы ее осуществления / Н. В. Деркач, Я. И. Шаповаленко // Academy. – 2017. – № 11 (26).

2 **Крышов, С. И.** Проблемы звукоизоляции строящихся зданий / С. И. Крышов // Жилищное строительство. – 2017. – № 6. – С. 8–10.

3 Об утверждении и введении в действие строительных норм : постановление М-ва архитектуры и строит. Респ. Беларусь от 15 сент. 2020 г. № 54 // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W22035941 (дата обращения: 05.09.2026).

4 **Оточин, В. Е.** Эффективность применения многослойных наружных стен в многоэтажном строительстве / В. Е. Оточин // Вестник науки. – 2025. – Т. 3, № 6 (87). – С. 2079–2093.

УДК 69.003:728.2.011.27:69.025

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ПЕРЕКРЫТИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МНОГОЭТАЖНОГО ЖИЛОГО ДОМА

М. Н. ТУШИНСКИЙ, А. В. СТЕПАНОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Перекрытия являются одним из наиболее массовых и ответственных элементов многоэтажного жилого здания. На их долю приходится значительная часть материалоемкости и стоимости несущего каркаса, а также трудоемкости возведения. Выбор рациональной конструктивной схемы перекрытия на ранних стадиях проектирования предопределяет не только технические характеристики здания, но и его итоговую экономическую эффективность. Целью проектирования, в соответствии с современными нормативными подходами, является минимизация стоимости конструкции на протяжении всего срока службы, что включает затраты на возведение, эксплуатацию и ликвидацию последствий вероятного отказа.

Критерии выбора конструктивной схемы перекрытия:

– стоимость возведения – прямые затраты на материалы, изготовление и монтаж конструкций;

– материалоемкость – расход бетона и арматурной стали на 1 м² перекрытия;

– трудоемкость и продолжительность работ – затраты труда и машинного времени, а также скорость возведения этажа;

– технологичность – потребность в специальном оборудовании (краны, опалубка), сезонность работ;

– эксплуатационные характеристики – звукоизоляция, огнестойкость, несущая способность, возможность устройства проемов;

– гибкость планировочных решений – допустимые пролеты и конфигурация перекрытия в плане.

Согласно исследованиям, наибольшее влияние на экономическую эффективность перекрытия оказывает его толщина, которая, в свою очередь, определяется принятой конструктивной схемой и шагом несущих конструкций. При этом компромисс между прочностью и гибкостью планировки достигается при определенных комбинациях параметров; например, для монолитных безбалочных перекрытий рациональным признан шаг колонн 5,2 м в сочетании с плитой толщиной 180 мм.

В современной практике жилищного строительства наибольшее распространение получили следующие схемы. Сборные железобетонные перекрытия выполняются из многопустотных плит заводского изготовления (серий ПК, ПБ), укладываемых на несущие стены или балки. Стандартная толщина плит составляет 220 мм, максимальный пролет – до 7,2 м для плит ПК и до 12 м для плит ПБ. Ключевое преимущество – высокая степень заводской готовности и скорость монтажа (1–2 дня на 100 м²), что обеспечивает низкую стоимость (ориентировочно 3000–4500 руб./м²). Однако схема имеет ограничения: перекрытие в плане может быть только прямоугольным, устройство проемов затруднено, а для монтажа требуется автокран.

Монолитные железобетонные перекрытия представляют собой цельную плиту, бетонируемую на строительной площадке. Стандартная толщина для пролетов до 6 м составляет 180–220 мм. Такая схема обеспечивает свободу архитектурного формообразования (эркеры, криволинейные участки), возможность устройства проемов любого очертания и высокую звукоизоляцию. Стоимость монолитного перекрытия выше – 4000–6000 руб./м², а сроки набора прочности бетона (до 28 суток) существенно увеличивают продолжительность работ. Кроме того, монолитные перекрытия требуют

устройства опалубки и характеризуются повышенным расходом арматуры: для пролетов 6–8 м он составляет 18–24 кг/м² против 5–7 кг/м² для сборных преднапряженных плит.

Сборно-монолитные перекрытия занимают промежуточное положение. Они могут выполняться с использованием несъемной опалубки, пустотообразователей из пластиковых шаров или блоков. Исследования показывают, что применение эффективных пустотообразователей позволяет уменьшить массу плиты на 20–40 % и сократить расход бетона до 40 % без снижения несущей способности. Себестоимость сборно-монолитного перекрытия может быть снижена примерно на 10 % по сравнению с ближайшими известными аналогами. В странах Евросоюза доля сборно-монолитных конструкций в перекрытиях составляет от 20 до 35 %, объясняется их меньшим собственным весом и улучшенными показателями теплозащиты и звукоизоляции.

Безбалочные (плоские) перекрытия широко применяются в монолитном каркасном строительстве. Согласно зарубежным исследованиям, для нагрузок и пролетов, характерных для жилищного строительства, безбалочная система (flat plate) является наиболее экономически эффективным решением. Однако при пролетах свыше 6 м эффективность безбалочных перекрытий снижается из-за увеличения собственного веса и расхода материалов. Для повышения экономичности применяются инновационные решения – многопустотные безбалочные перекрытия с пустотообразователями, позволяющие сэкономить до 25% бетона и до 20 % арматурной стали.

Перекрытия по стальным балкам с монолитным заполнением или профлистом используются в сталежелезобетонных каркасах. Их применение целесообразно при больших пролетах и высоких нагрузках, однако стоимость металла составляет до 87,8 % в структуре затрат, что делает такие перекрытия менее конкурентоспособными в массовом жилищном строительстве по сравнению с железобетонными вариантами.

Обобщая данные, можно выделить следующие ключевые различия:

– по стоимости: сборные перекрытия на 15–20 % дешевле монолитных в пересчете на 1 м². Однако при сложной конфигурации здания монолит обеспечивает экономию за счет отказа от дорогостоящих доборных элементов;

– материалоемкости: сборные преднапряженные плиты имеют наименьший расход стали (5–7 кг/м²), тогда как монолитные перекрытия требуют в 3–4 раза больше арматуры;

– трудозатратам: возведение сборно-монолитного каркаса сокращает трудозатраты в 1,7–2 раза по сравнению с монолитным, а темпы возведения возрастают в 1,4–1,5 раза;

– гибкости планировки: монолитные и сборно-монолитные схемы обеспечивают максимальную свободу архитектурных решений, тогда как сборные плиты ограничены прямоугольной сеткой.

Выбор конструктивной схемы перекрытия многоэтажного жилого дома не может быть сведен к единственному универсальному решению. Технико-экономическое обоснование должно учитывать конкретные условия: конфигурацию здания в плане, принятый шаг несущих конструкций, доступность местной базы сборного железобетона, требуемые сроки возведения и эксплуатационные требования. Для зданий простой прямоугольной формы с регулярной сеткой колонн экономически целесообразно применение сборных многопустотных плит. Комплексная оптимизация параметров перекрытия (толщины, шага колонн, класса бетона и процента армирования) по критерию минимизации приведенных затрат позволяет достичь существенного снижения стоимости несущего каркаса и повышения общей эффективности проекта.

УДК 711.424-168

НОВАЯ ЖИЗНЬ МАЛЫХ ИСТОРИЧЕСКИХ ГОРОДОВ

А. В. УШАКОВА, К. И. ХУДЕНКО, В. М. ПРАСОЛ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Статья посвящена проблеме разграничения подлинной ревитализации исторических городов и внешнего, декоративного обновления. На примере Матеры (Италия), Мино (Япония) и Тбилиси (Грузия) показаны различные сценарии работы с наследием – от адаптивного повторного использования до утраты подлинной городской ткани. Сформулирован практический принцип «минимального вмешательства при максимальном количестве связей». Рассмотрен белорусский контекст: гос-

ударственный список историко-культурных ценностей, проблема неэффективного использования усадеб, проект COMUS Совета Европы, а также обнадёживающие примеры – усадьба Станьково, мастер-план Несвижа, культурно-исторический парк «Старый город» в Гродненской области.

Концепция новой жизни исторических городов в наши дни, к сожалению, слишком часто воспринимается упрощённо – как череда визуальных преобразований. Реставрированные до блеска фасады, благоустроенные пешеходные площади, стилизованные под старину вывески и аккуратные гранитные плиты – всё это создаёт привлекательную картинку для туристических буклетов. Однако за этим внешним лоском нередко скрывается тревожная пустота: красивые здания, в которых никто не живёт, отреставрированные особняки без рабочих мест, ухоженные улицы, лишённые повседневной активности, шума детских голосов и привычного ритма жизни местных сообществ. Город превращается в декорацию, в музей под открытым небом, где прошлое «запечатано», а настоящее так и не наступает.

Ключевой вопрос, который должен стоять в центре любой стратегии ревитализации заключается вовсе не в том, как сохранить старинные стены, своды и лепнину. Это вопрос вторичный, технический. Главное – понять: кто и для каких целей будет использовать эту историческую ткань, кто будет жить в этих домах, работать в этих мастерских и конторах, растить детей в этих дворах? Без ответа на этот вопрос любая реставрация рискует превратиться в дорогостоящую имитацию жизни, в театральные декорации для краткосрочного туристического взгляда. Именно поэтому новая жизнь исторического города – это не просто очередной проект по реставрации, не смета на ремонт кровли и не программа по замене окон. Это, прежде всего, стратегия выживания территории в долгосрочной перспективе. Реставрация в такой логике перестаёт быть самоцелью и становится лишь инструментом – одним из многих. Она подчинена более важной задаче: вернуть городу жизнь, сделать его пригодным для современного человека, не разрушая при этом его идентичность.

Ссылаясь на зарубежный опыт, можно констатировать, что Матера (Италия) часто рассматривается как идеальный пример адаптивного повторного использования. Пещерные жилища Сасси стали бутиками, ресторанами и культурными центрами, а город был объявлен культурной столицей Европы в 2019 году. Однако за этим успехом стоит менее известная история: в 1950-х годах итальянское правительство признало Сасси символом бедности и антисанитарии, принудительно переселив всех жителей. На протяжении десятилетий район оставался мёртвой зоной. Лишь после включения в список Всемирного наследия ЮНЕСКО в 1993 году начался медленный процесс возвращения функций и людей. Первые инвестиции 1980-х годов не принесли ожидаемой отдачи – потребовалось почти сорок лет, чтобы Матера стала экономически устойчивым проектом. Урок для малых городов: возрождение – это длительный процесс, а не мгновенный результат [1].

Японский город Мино (префектура Гифу) демонстрирует иную логику. С населением около 18 тысяч человек и уровнем пустующих домов свыше 15 % Мино сталкивается с теми же проблемами, что и многие малые города Беларуси: отток населения, закрытие предприятий, утрата идентичности. Вместо ожидания крупного инвестора город начал с одного объекта: бывший дом производителя бумаги был превращён в гостевой дом в традиционном стиле с использованием местной бумаги васи. Затем было создано коворкинг-пространство в другом старом здании. Цель – не столько привлечение туристов на «ночёвку», сколько увеличение числа «связанных людей»: тех, кто не живёт в городе постоянно, но регулярно возвращается, работает удалённо и участвует в местных инициативах. Эта модель более реалистична для малых городов: она не обещает массового туризма, но создаёт стабильный, хотя и небольшой поток людей и ресурсов [4].

Если ранее речь шла об идеальной модели концепции новой жизни, то опыт грузинской столицы представляет собой контрпример. Запущенная около 2009 года программа «Новая жизнь для старого Тбилиси» (New Life for Old Tbilisi), на первый взгляд, провозглашала «обновление» и «возрождение», но на деле привела к результату, прямо противоположному заявленным целям: массовому сносу исторических зданий, выселению коренных жителей и замене подлинной застройки грубыми имитациями. Итогом стала не ревитализация, а тяжёлая утрата подлинной городской ткани. Сама реализация этой программы изначально несла в себе угрозу: государство предоставляло застройщикам гарантии для получения банковских кредитов при условии, что те возьмут на себя жилищное строительство, переселят жителей из ветхих домов, а освободившуюся землю выведут на рынок под коммерческую застройку. Жителей обязывали к переезду, при этом права на возвращение в реконструированное жильё они не имели. По имеющимся данным, только на первом этапе

было переселено 450 семей, а освобождённые исторические кварталы были включены в инвестиционный рынок недвижимости.

Грузинская ситуация наглядно показывает: когда новая жизнь сводится к визуальной унификации и коммерческой привлекательности, в жертву приносится именно то, что делает место уникальным, – материальная подлинность, преемственность социальной структуры и богатство исторических наслоений. Эти заново отполированные «новые старые города» в итоге производят впечатление пустоты: на ярко освещённых по ночам псевдоисторических фасадах окна по большей части тёмные, а люди, когда-то наполнявшие город жизнью, уехали. Это не возрождение, а тщательно замаскированная под «новое» тотальная подмена. Урок Тбилиси стоит принять к сведению тем, кто сталкивается с задачей обновления исторических городов: если новая жизнь означает лишь покрытие старой ткани более чистым, более однородным и более «европейским» фасадом, то она приносит не новое рождение городам, улицам и деревням, а аккуратно скрытое «старое» [5].

Примером практического принципа служит минимальное вмешательство при максимальном количестве связей. Минимальное вмешательство подразумевает приоритет ремонта над сносом, адаптации над новым строительством и локальных действий над генеральным планом. Малые города Беларуси не испытывают недостатка в исторических зданиях – им не хватает «интерфейсов» между наследием и современной жизнью. Показателен случай деревни Бобровня, где пара вернулась в родительский дом и годами приводила его в порядок. Без туристической стратегии и брендинга это стало толчком для других: пустующие дома начали находить новых владельцев. Движущей силой оказалась личная привязанность к конкретному месту, а не государственная программа.

По данным Министерства культуры Республики Беларусь, в государственном списке историко-культурных ценностей насчитывается 5696 объектов, среди которых памятники архитектуры, градостроительства, истории и искусства. В стране сохранилось около 1200 полностью или частично уцелевших исторических усадеб, однако современное использование многих из них неэффективно: они находятся в плохом техническом состоянии и разрушаются, обладая при этом культурным и туристским потенциалом [3]. Проект COMUS Совета Европы, реализуемый в странах Восточного партнёрства, среди ключевых проблем малых исторических городов называет недостаток эффективных стратегий городского планирования, упадок из-за депопуляции, слабое развитие гражданского общества и фрагментарность городских интервенций, основанных на отраслевых стратегиях [2].

Тем не менее есть и обнадёживающие примеры. Усадьба Станьково в Дзержинском районе, связанная с родом Гуттен-Чапских, постепенно возвращается к жизни: обновляется скарбница, а в 2015 году пивзавод «Аліварыя» инициировал реставрацию комплекса, разыскав даже потомка Кароля Чапского. Это пример того, как частный бизнес может стать оператором наследия, вкладывая ресурсы в его сохранение и одновременно используя его как часть своей корпоративной идентичности. Студенты архитектурного факультета БНТУ разработали мастер-план обустройства культурно-туристической зоны Несвижа, ориентированный на комфорт гостей при сохранении уникальной исторической составляющей. В Гродненской области начато строительство культурно-исторического парка «Старый город», где на «затерянной» улочке возведут десять исторических домов, отражающих дух Гродно конца XVII – начала XX века.

В заключение можно выделить тот факт, что ЮНЕСКО в рекомендациях по культуре для устойчивого городского развития подчёркивает: сохранение городского наследия должно быть интегрировано в ориентированные на человека стратегии городской регенерации, а материальные и нематериальные культурные ресурсы малых поселений должны быть сохранены для повышения экономических и социальных выгод в более широком региональном контексте. Малые города Беларуси обладают значительным наследием, но их будущее зависит от того, найдутся ли операторы – государственные, частные или общественные, – готовые взять на себя ответственность за конкретные пространства и наполнить их.

Список литературы

1 Рекомендации ЮНЕСКО по культуре для устойчивого городского развития. 2016. – URL: unesco.org/creativity/publication/culture-urban-future (дата обращения: 20.09.2026).

2 Проект COMUS Совета Европы: итоговые материалы. – Страсбург, 2018.

3 Государственный список историко-культурных ценностей Республики Беларусь / М-во культуры Респ. Беларусь. – Минск, 2024.

4 **Орельская, О. В.** Современная зарубежная архитектура : учеб. пособие / О. В. Орельская. – М. : Академия, 2006. –

268 с.
5 **Глазычев, В. Л.** Архитектура. Энциклопедия / В. Л. Глазычев. – М. : АСТ : Астрель, 2002. – 672 с.

УДК 692.522:69.059

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ КАМЕННЫХ СТЕН И ПРОСТЕНКОВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ И РЕМОНТЕ ЗДАНИЙ

А. А. ЧЕРНЯКОВ, В. В. ТАЛЕЦКИЙ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

При реконструкции и ремонте зданий с каменными стенами и простенками часто возникает необходимость их восстановления или усиления.

Традиционными методами восстановления являются: оштукатуривание, инъецирование трещин, частичная или полная перекладка элементов.

Оштукатуривание применяют при повреждении наружной версты кладки в виде выветривания раствора из швов, размораживания и разрушения, а также при наличии стабилизированных осадочных трещин. Оштукатуривание осуществляют цементно-песчаным или полимерцементным раствором вручную или торкретированием. Для надежного сцепления штукатурного слоя с каменной кладкой могут применяться металлические сетки из проволоки или стеклосетки. Металлические сетки крепят анкерами, устанавливаемыми в швы кладки, стеклосетки наклеивают полимерцементным раствором на подготовленную поверхность.

Если кладка имеет сквозные трещины при стабилизировавшихся осадках, их заполняют цементным или полимерцементным раствором под давлением с помощью инъекторов.

Частичная или полная перекладка участков стен выполняется при наличии большого количества глубоких и сквозных трещин. Для перекладки применяют кирпич и раствор не ниже марки кирпича и раствора восстанавливаемой кладки. При перекладке участков должна быть сохранена принятая перевязка швов.

Для местного усиления каменных стен, имеющих сквозные трещины, применяют скобы из круглой стали, концы которых закрепляют в кладке на глубину не менее 100 мм и накладки из листовой или профильной стали (уголки или швеллеры), закрепляемые на усиливаемых участках стен с помощью стяжных болтов. Скобы и накладки размещают с одной или двух сторон усиливаемого участка на поверхности, в горизонтальных швах и в предварительно подготовленных штрабах.

В настоящее время при усилении каменных конструкций начинают применять композитные материалы, используя ткани, ленты, холсты. Они производятся из армирующего и связующего компонентов. Такая система усиления распространена под названием *FRP* (*FiberReinforcedPolymer*) – усиление полимерным волокном.

Полимерные системы (*FRP*) имеют небольшой вес, высокую прочность и коррозионную стойкость. В качестве армирующих элементов используются неорганические и органические волокна. Неорганические волокна – это стекловолокно, базальтовое волокно и углеволокно. Органические волокна – это в основном арамидные волокна. Сравнение физико-механических характеристик волокон и стали приведено в таблице 1. Очевидно, что предел прочности при растяжении у *FRP* материалов примерно в 6–10 раз выше, чем у стали. Это и явилось определяющим фактором для использования этих материалов при усилении каменных конструкций.

Рассматриваемая технология усиления каменных конструкций заключается в наклейке с помощью особого эпоксидного клея или клея на основе микроцемента на поверхность конструкций высокопрочных холстов. Усиление выполняется по подготовленной поверхности кладки, с пропиткой и грунтовкой поверхностного слоя. Возможно усиление изгибаемых конструкций в растянутых зонах и на приопорных участках в зоне действия поперечных сил, а также сжатых и внецентренно сжатых элементов.

Так как кирпичная кладка при растяжении имеет меньшую прочность, чем при сжатии, разрушение кладки происходит, когда растягивающие напряжения превышают допустимые значения. Поэтому усиление кирпичной кладки делается для того, чтобы восполнить недостаток несущей способности на растяжение. Следовательно, сетки, ленты должны располагаться параллельно

направлению растягивающих усилий.

Таблица 1 – **Сравнение физико-механических характеристик различных волокон и стали**

Материал	Модуль Юнга, ГПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Деформация при разрыве, %	Удельный вес, г/см^3
Углеродное волокно (лента)	240–280	3500	1,6–1,73	1,75
Стекловолокно (лента)	85–95	2500	4,5–5,5	2,46–2,49
Арамид (лента)	120	3200	1,0–2,5	1,44
Сетка из углеродного волокна	230	3500	1,5–1,8	1,8
Сетка из стекловолокна	70	2800	1,0–3,0	3,0–3,5
Сетка базальтовая	87	4000	2,06–6,0	2,8–3,2
Сталь	206	350–600	20–30	7,8

На рисунке 1 показаны примеры расположения лент и сеток при образовании вертикальных и наклонных трещин.

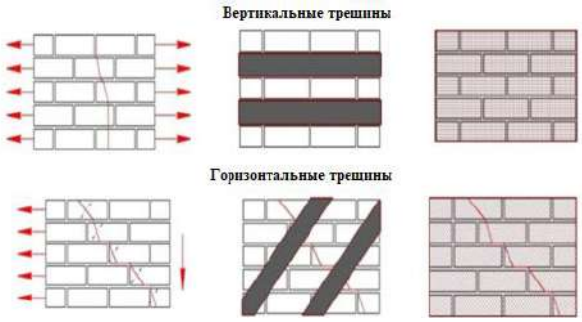


Рисунок 1 – Расположение лент и сеток при образовании вертикальных и наклонных трещин

Эффективность усиления зависит от вида армирующего компонента композитного материала и значения его предела прочности на разрыв. Поэтому были рассмотрены варианты усиления при использовании сеток и лент из углеродного волокна, стекловолокна, арамидного и базальтового волокна.

В результате расчета получено, что самый высокий показатель эффективности усиления лентами у лент из углеродного волокна, а при усилении сетками у сеток из базальтового волокна.

Итоги расчета технологической эффективности усиления лентами и сетками приведены на рисунке 2.

а) *б*)

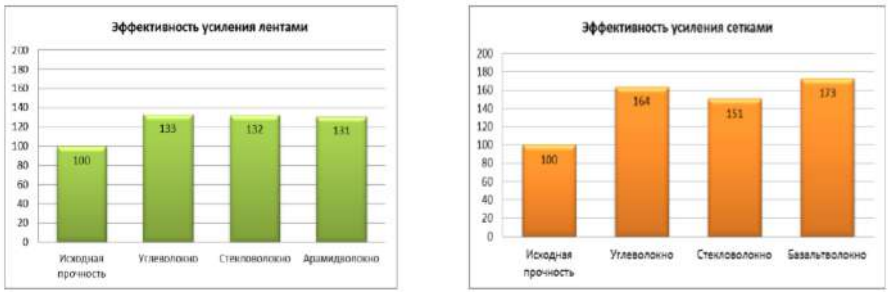


Рисунок 2 – Технологическая эффективность усиления простенка лентами и сетками:
а – при усиления лентами; *б* – при усилении сетками

В расчетах прочности усиление углеродным и арамидным волокном выполнено через 3 ряда кладки. При усилении стекловолокном понадобилось армирование через 2 ряда кладки. Но, если рассматривать стоимость по данным производителей, усиление стекловолокном примерно в 2 раза дешевле, несмотря на большее количество требуемого материала по сравнению с углеродным волокном.

По результатам усиления сетками можно сделать вывод, что, самое большое значение эффективности по прочности имеют сетки из базальтового волокна. Усиление сетками из стекловолокна менее эффективно по прочности, но с точки зрения стоимости оказалось самым дешевым материалом среди композитных сеток.

Следует отметить следующие достоинства системы *FRP* усиления каменных конструкций: кор-

розионная стойкость; высокий показатель прочности на разрыв арматуры; легкость монтажа; небольшой вес материала; универсальность применения к любым формам.

К недостаткам можно отнести высокую стоимость материала, низкую огнестойкость эпоксидных клеев (начиная от 50 °С).

Вывод. Выбор оптимального решения при ремонте каменной кладки носит комплексный характер и является сложной инженерной задачей. Поэтому всегда требуется разработка рекомендаций по оценке надежности и стоимости принятых методов усиления в различных случаях, доступных проектировщикам и конечным потребителям.

УДК 658.513.4:001.895

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ СОСТАВОВ ДЛЯ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

М. Д. ЧИЖИК
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Обеспечение долговечности и эксплуатационной надежности бетонных конструкций является одной из основных задач современного строительства. Воздействие влаги на бетон может приводить к развитию процессов, снижающих его эксплуатационные характеристики, а также создавать условия для коррозии арматуры и постепенного сокращения срока службы конструкций. В связи с этим применение эффективных гидроизоляционных материалов является важным элементом системы защиты бетонных конструкций. Выбор гидроизоляционного состава должен осуществляться с учетом не только его способности ограничивать проникновение воды, но и особенностей конструкции, условий эксплуатации и технологии нанесения.

Современный рынок строительных материалов характеризуется значительным разнообразием гидроизоляционных составов и технологий их применения. Различные материалы отличаются механизмом защитного действия, способом нанесения, характером взаимодействия с бетонным основанием, долговечностью и областью рационального применения [1–4]. Поэтому непосредственное сравнение материалов только по одному показателю не позволяет объективно определить наиболее эффективное решение для конкретной конструкции.

Целью работы является проведение сравнительного анализа современных гидроизоляционных составов для бетонных конструкций с определением их основных преимуществ, ограничений и рациональных областей применения.

Современные гидроизоляционные материалы могут быть систематизированы по характеру защитного воздействия и способу формирования гидроизоляционного барьера. К основным группам относятся проникающие, обмазочные, рулонные, инъекционные и мембранные материалы. Отдельную группу составляют штукатурные гидроизоляционные материалы и гидрофобизирующие составы. Выбор конкретного материала определяется сочетанием эксплуатационных требований, состояния бетонного основания, наличия трещин и дефектов, характера воздействия влаги и требований к долговечности.

Одним из перспективных направлений являются проникающие гидроизоляционные составы. Их особенностью является возможность проникновения активных компонентов в капиллярно-пористую структуру бетона с последующим образованием малорастворимых соединений и снижением водопроницаемости. Такие материалы могут наноситься на влажную поверхность бетона, сохраняют его паропроницаемость и способны обеспечивать защиту при воздействии воды под давлением. Вместе с тем проникающие составы предъявляют повышенные требования к подготовке основания и не предназначены для перекрытия крупных трещин и значительных деформационных дефектов.

Обмазочные материалы формируют преимущественно поверхностный защитный слой. К данной группе относятся различные цементные, битумные и полимерные составы. Их преимуществами являются сравнительно простая технология нанесения, доступность и широкий ассортимент. При этом эффективность обмазочной гидроизоляции в значительной степени зависит от качества

подготовки бетонного основания. Существенным ограничением является чувствительность некоторых покрытий к трещинообразованию и деформациям основания. Поэтому применение таких материалов требует оценки состояния конструкции и обеспечения совместимости покрытия с основанием.

Рулонные гидроизоляционные материалы обеспечивают создание поверхностного многослойного защитного барьера. При правильном выполнении работ они характеризуются высокой надежностью и долговечностью. Данная технология широко применяется при устройстве гидроизоляции фундаментов, подземных стен и плоских кровель. Основными недостатками являются повышенная трудоемкость выполнения работ, необходимость тщательной подготовки основания и высокая зависимость надежности системы от качества устройства соединений и швов.

Особое место занимают инъекционные гидроизоляционные составы. Их принцип действия заключается в нагнетании материала в трещины, швы, пустоты и другие дефектные зоны конструкции. Преимуществом данного способа является возможность локального восстановления водонепроницаемости без полного вскрытия конструкции. Инъекционная технология особенно эффективна при ремонте эксплуатируемых сооружений, когда непосредственный доступ к поврежденным участкам ограничен. Вместе с тем применение инъекционных материалов требует специального оборудования и квалифицированного выполнения работ, а стоимость такой технологии может быть выше по сравнению с традиционными поверхностными способами защиты.

Мембранные материалы создают сплошной поверхностный гидроизоляционный барьер и отличаются высокой эластичностью, долговечностью и устойчивостью к воздействию агрессивных сред. Благодаря этим свойствам они могут применяться в тоннелях, резервуарах и сложных гидротехнических конструкциях. Однако особое внимание при их использовании необходимо уделять устройству и герметизации швов, примыканий и проходок. Кроме того, мембранные системы характеризуются более высокой стоимостью и требуют соблюдения технологических требований при монтаже.

Отдельным направлением являются гидрофобизирующие составы, механизм действия которых связан с изменением смачиваемости поверхности пор бетона. В результате снижается водопоглощение материала при сохранении возможности прохождения водяного пара. Такой подход целесообразен в тех случаях, когда требуется уменьшить поступление влаги в бетон без формирования сплошного паронепроницаемого покрытия.

Сравнение различных групп показывает, что универсального гидроизоляционного материала, одинаково эффективного во всех условиях эксплуатации, не существует. Например, проникающие составы рационально использовать для монолитных бетонных конструкций и стен подвалов, где требуется глубинная защита бетона. Рулонные материалы целесообразны при гидроизоляции фундаментов, подземных стен и плоских кровель. Инъекционные составы наиболее эффективны при необходимости локального ремонта трещин, швов и протечек в эксплуатируемых конструкциях. Мембранные системы могут использоваться в сооружениях, предъявляющих повышенные требования к эластичности, долговечности и химической стойкости.

Таким образом, сравнительная оценка должна учитывать не только непосредственно водонепроницаемость, но и технологические, конструктивные и эксплуатационные факторы. К ним относятся способ нанесения, состояние бетонного основания, наличие трещин, воздействие напорной воды, агрессивность среды, требования к паропроницаемости, возможность проведения ремонтных работ и ожидаемый срок эксплуатации.

Особое значение имеет комплексный подход к выбору гидроизоляционной системы. Предлагается сопоставлять характеристики конкретного объекта с функциональными показателями гидроизоляционного материала, включая водопроницаемость, глубину проникновения, адгезию, устойчивость к циклическим воздействиям и способность воспринимать воздействие воды. Такой подход позволяет перейти от выбора материала по отдельному показателю к оценке его соответствия реальным условиям эксплуатации.

При этом эффективность гидроизоляции определяется не только характеристиками самого состава. Существенное влияние оказывают подготовка основания, соблюдение технологии нанесения, условия твердения и эксплуатации. Неправильно подготовленная поверхность, нарушение толщины защитного слоя или несоблюдение технологических условий способны снизить фактическую эффективность даже материала с высокими заявленными характеристиками.

В результате сравнительного анализа можно сделать вывод, что рациональный выбор гидроизо-

ляции должен осуществляться с учетом назначения бетонной конструкции и характера воздействия влаги. Для новых конструкций преимущество может иметь глубинная или поверхностная защита, обеспечивающая комплексное снижение водопроницаемости. Для эксплуатируемых сооружений при наличии локальных дефектов более целесообразным решением может стать инъекционная технология. В условиях значительных деформаций основания предпочтение следует отдавать системам, способным воспринимать возникающие перемещения без нарушения целостности гидроизоляционного барьера.

Выводы. Проведенный анализ современных гидроизоляционных составов показывает, что эффективность защиты бетонных конструкций определяется соответствием выбранного материала конкретным условиям эксплуатации. Проникающие, обмазочные, рулонные, инъекционные и мембранные системы обладают различными механизмами действия, технологическими особенностями, преимуществами и ограничениями.

Наиболее рациональным является не выбор универсального гидроизоляционного состава, а подбор системы защиты с учетом состояния бетонного основания, характера воздействия влаги, наличия дефектов, требований к долговечности и технологии производства работ. Комплексная оценка указанных факторов позволяет повысить надежность гидроизоляции, снизить вероятность возникновения протечек и увеличить срок службы бетонных конструкций.

Список литературы

1 **Тухарели, В. Д.** Современные строительные системы гидрозащиты зданий и сооружений / В. Д. Тухарели, А. В. Тухарели, Т. Ф. Чередниченко. – 2019. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_39189494_41073129.pdf (дата обращения: 07.09.2026).

2 **Логанина, В. И.** Теплоизоляционные сухие строительные смеси с применением диатомита : монография / В. И. Логанина, Е. Е. Симонов. – Пенза : ПГУАС, 2013. – URL: https://library.pguas.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/819/ Логанинарdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 07.09.2026).

3 **Демьянова, В. С.** Эффективные строительные материалы с использованием техногенных отходов : монография / В. С. Демьянова, А. Д. Гусев. – Пенза : ПГУАС, 2013. – 128 с. – URL: https://library.pguas.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/698/Демьянова Гусев Эффект стр матлы.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 07.09.2026).

4 **Омаров, А. О.** Обоснование критериев эффективности материалов для рациональных ограждающих конструкций и описание технологии эффективных конструкционно-теплоизоляционных ячеистых бетонов на пористых заполнителях / А. О. Омаров // Вестник Евразийской науки. – 2021. – Т. 13, №. 1. – С. 11. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ obosnovanie-kriteriev-effektivnosti-materialov-dlya-ratsionalnyh-ograzhdayuschih-konstruktsiy-i-opisanie-tehnologii-effektivnyh (дата обращения: 07.09.2026).

УДК 658.513.4:001.895

ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ СОСТАВОВ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНА

М. Д. ЧИЖИК, Т. В. ЯШИНА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Долговечность и надежность бетонных и железобетонных конструкций во многом определяются их устойчивостью к воздействию влаги и агрессивных сред. Проникновение воды в поровое пространство бетона способствует развитию процессов коррозии арматуры, выщелачивания компонентов цементного камня, образования и расширения дефектов, а также снижению эксплуатационного ресурса конструкций. Поэтому применение эффективных гидроизоляционных материалов является одним из основных направлений повышения долговечности строительных конструкций.

Современный рынок строительных материалов представлен широким спектром гидроизоляционных составов, различающихся механизмом действия, способом нанесения и областью применения. К ним относятся проникающие, обмазочные, рулонные, инъекционные, мембранные материалы, а также гидрофобизирующие составы и гидроизоляционные добавки. Их воздействие на бетон может выражаться не только в снижении водопроницаемости, но и в изменении водопоглощения, морозостойкости, капиллярного подсоса и сопротивления проникновению агрессивных веществ.

В связи с этим оценка эффективности гидроизоляции должна основываться не на одном показа-

теле, а на совокупности эксплуатационных характеристик бетона. В нашей работе предусмотрен комплексный подход, включающий сопоставление технических параметров материала с условиями эксплуатации конструкции.

Целью работы является аналитическая оценка влияния различных типов современных гидроизоляционных составов на основные эксплуатационные характеристики бетона и определение наиболее эффективных вариантов защиты в зависимости от условий эксплуатации бетонных конструкций.

В качестве основных критериев оценки эффективности гидроизоляционной защиты рассмотрены водопоглощение, водонепроницаемость, морозостойкость, коэффициент фильтрации и сопротивление проникновению хлоридов. Выбор данных показателей обусловлен их непосредственной связью с процессами проникновения влаги и агрессивных веществ в структуру бетона.

Одним из наиболее значимых показателей является водопоглощение. Снижение количества воды, поступающей в поровое пространство бетона, позволяет уменьшить вероятность развития процессов, связанных с циклическим замораживанием и оттаиванием, коррозией арматуры и воздействием растворенных агрессивных компонентов. Проникающие составы способны воздействовать непосредственно на капиллярно-пористую структуру бетона. Активные компоненты таких материалов при наличии влаги вступают во взаимодействие с компонентами цементного камня и формируют нерастворимые продукты, частично заполняющие капилляры.

Другим важным показателем является водонепроницаемость бетона. Для проникающих материалов повышение водонепроницаемости связано с уменьшением открытой капиллярной пористости и частичным блокированием путей фильтрации воды. Результаты исследований, приведенные в использованных материалах – показывают, что после обработки бетона некоторыми проникающими составами наблюдается уменьшение водопоглощения и повышение марки по водонепроницаемости [1–3].

Морозостойкость также непосредственно связана с водонасыщением бетона. Чем меньше количество воды находится в порах материала, тем ниже потенциальная опасность разрушения структуры при замерзании. Поэтому применение гидроизоляционных составов, обеспечивающих снижение водопоглощения и капиллярного подсоса, может способствовать повышению сопротивления бетона циклическому замораживанию и оттаиванию.

Для дополнительной оценки был рассмотрен коэффициент фильтрации, характеризующий способность материала пропускать воду через поровое пространство. Его снижение рассматривается как положительный фактор, поскольку уменьшение фильтрационных потоков ограничивает поступление влаги и растворенных в ней агрессивных веществ в бетон.

Отдельное значение имеет сопротивление проникновению хлоридов. Данные соединения представляют опасность прежде всего для железобетонных конструкций, поскольку их проникновение к арматуре может способствовать развитию коррозионных процессов. Поэтому гидроизоляционная система, одновременно снижающая водопроницаемость и диффузионный перенос агрессивных веществ, обеспечивает более комплексную защиту конструкции.

Для сопоставления различных вариантов гидроизоляционной защиты сформирована расчётно-аналитическая модель. В качестве базового принят условный контрольный бетон без дополнительной гидроизоляционной защиты. Для него показатели приняты за исходный уровень, относительно которого оценивалось изменение характеристик при использовании проникающего состава, гидрофобизатора и гидроизоляционной добавки в бетонную смесь.

Представленная модель показывает, что наиболее выраженное комплексное изменение рассматриваемых показателей характерно для гидроизоляционной добавки, вводимой непосредственно в бетонную смесь. Условный уровень водопоглощения при этом принят ниже контрольного примерно на 56 %, а расчетный показатель водонепроницаемости повышается до W16. Проникающий состав также демонстрирует выраженное снижение водопоглощения и коэффициента фильтрации при одновременном повышении морозостойкости.

Гидрофобизирующая обработка оказывает несколько менее выраженное влияние на водонепроницаемость бетонной структуры, однако позволяет существенно снизить водопоглощение и ограничить поступление влаги через поверхностный слой. Следовательно, рациональность применения конкретного состава должна определяться не только максимальным значением отдельного показателя, но и характером воздействия влаги на конструкцию.

Таблица 1 – **Расчётно-аналитическая оценка эксплуатационных характеристик бетона при применении различных**

типов гидроизоляционной защиты

Параметр	Контрольный бетон	Проникающий состав	Гидрофобизатор	Добавка в бетонную смесь
Водопоглощение, % по массе	6,8	3,2	4,3	3,0
Снижение водопоглощения, %	0	52,9	36,8	55,9
Водонепроницаемость	W4	W12	W8	W16
Морозостойкость, циклы	F100	F250	F175	F350
Коэффициент фильтрации, м/с	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$2{,}2 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-11}$
Относительное снижение проникновения хлоридов, раз	1,0	3,8	2,8	4,5
Комплексная эффективность, усл. ед.	1,00	1,36	1,19	1,43
Примечание – Значения таблицы являются расчётно-аналитическими и иллюстративными, сформированными для сопоставления вариантов гидроизоляционной защиты. Они не являются результатами лабораторных испытаний, проведённых автором.				

Для повышения объективности сравнительной оценки в модели использован комплекс показателей. Интегральный показатель эффективности в данном случае рассматривается как условная характеристика, позволяющая сопоставить варианты между собой. Его использование не заменяет лабораторную проверку, а демонстрирует принцип комплексной оценки, предусмотренный методикой исследования. В реальных условиях инженерная оценка должна учитывать характеристики конкретного бетона, величину гидростатического давления, наличие трещин, температурно-влажностный режим, агрессивность среды и технологические ограничения при нанесении материала.

Следует учитывать, что эффективность проникающей гидроизоляции зависит от состояния цементного камня, наличия влаги и возможности протекания необходимых химических реакций. В частности, эффективность активных составов связана с наличием доступного гидроксида кальция и благоприятными условиями влажности и температуры. Поэтому даже материал с высокими заявленными характеристиками не может рассматриваться как универсальное решение для всех типов бетонных конструкций.

Таким образом, применение современных гидроизоляционных составов позволяет рассматривать гидроизоляцию не только как поверхностный барьер, но и как средство целенаправленного изменения эксплуатационных характеристик бетонной конструкции. Проникающие составы преимущественно воздействуют на капиллярно-пористую структуру, гидрофобизаторы изменяют свойства поверхности, а добавки в бетонную смесь обеспечивают защиту материала на стадии формирования его структуры. При этом выбор конкретной технологии должен осуществляться с учетом условий эксплуатации и требований к долговечности конструкции.

Проведенный расчётно-аналитический анализ показывает, что современные гидроизоляционные составы способны существенно влиять на эксплуатационные характеристики бетона. Наиболее существенными критериями оценки являются водопоглощение, водонепроницаемость, морозостойкость, коэффициент фильтрации и сопротивление проникновению агрессивных веществ.

Проникающие составы обеспечивают комплексное воздействие на капиллярно-пористую структуру бетона и могут применяться для повышения его водонепроницаемости. Гидрофобизирующие материалы преимущественно ограничивают поступление влаги через поверхностный слой конструкции. Гидроизоляционные добавки в бетонную смесь позволяют формировать повышенную водостойкость материала непосредственно на этапе изготовления бетонной смеси.

Полученная расчётно-аналитическая модель подтверждает целесообразность использования комплексного подхода при выборе гидроизоляции. При этом приведенные числовые значения имеют иллюстративный характер и требуют экспериментальной верификации перед использованием в качестве фактических показателей конкретных материалов. Практическая эффективность гидроизоляционной системы определяется не только уровнем отдельных технических характеристик, но и соответствием материала условиям эксплуатации конструкции, технологии нанесения, состоянию бетонного основания и предполагаемым воздействиям окружающей среды.

Список литературы

1 Исследование физико-механических свойств бетона с добавлением многофункциональной добавки / А. Н. Перевощикова, И. В. Вольцифер, Н. Б. Кондрашова, Н. С. Воронина // Нанотехнологии в строительстве. – 2024. – Т. 16, №. 2. – С. 170.

3 **Демьянова, В. С.** Эффективные строительные материалы с использованием техногенных отходов : монография / В. С. Демьянова, А. Д. Гусев. – Пенза : ПГУАС, 2013. – 128 с. – URL: https://library.pguas.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/698/Демьянова Гусев Эффект стр матлы.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 07.09.2026).

3 Исследование гидрофизических свойств тяжелого бетона, модифицированного комплексным модификатором и ра-

ботающего в суровых условиях эксплуатации / Е. В. Ткач, Ю. С. Филимонова, Д. Р. Янкович, В. И. Паевский // Вестник Тверского государственного технического университета. Сер.: Строительство. Электротехника и химические технологии. – 2024. – № 4. – С. 31–42. – URL: https://vestnik-tstu.ru/files/676fd2a0043033.92640743.689.pdf (дата обращения: 07.09.2026).

УДК 691-033:574

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ МАТЕРИАЛОВ

А. С. ЧУГУНОВА
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В связи с увеличением темпа и объемов урбанизации городов, актуальность возведения жилья и строительства в целом возрастает, в том числе малоэтажного. Стремительно растет спрос на новые строительные материалы, в том числе конструкционные, теплоизоляционные и отделочные в качестве альтернативы традиционному кирпичу, бетону, дереву. На этом фоне особенно востребованы композиционные изделия, произведенные на основе древесного сырья. В то же время проблема переработки вторичного сырья сегодня приобрела важный характер.

Увеличение объема производства и расширение номенклатуры материалов и изделий, утилизация отходов деревоперерабатывающих предприятий является актуальной задачей, решение которой частично можно осуществить путем организации производства строительных материалов и изделий на основе древесных отходов.

Создание строительных материалов на основе древесных отходов позволяет решать сразу две масштабные задачи: рациональное использование природных ресурсов за счет вторичной переработки сырья и получение новой продукции с высокими потребительскими свойствами при сравнительно низкой рыночной стоимости [1].

Древесные отходы образуются на всех стадиях заготовки, обработки древесины и изготовления из нее продукции. В соответствии с классификатором отходов [2] рассматриваемые отходы относятся к разделу 7 «Древесные отходы». Раздел включает три группы:

– отходы обработки и переработки древесины;

– древесные отходы производства и потребления;

– древесные отходы, полученные в процессе лесозаготовки.

В современном строительстве частое применение имеют следующие древесно-композитные материалы: щепо-цементные блоки типа арболит, гипсостружечные плиты, брус из клееного шпона, ОСП (ориентированно-стружечная плита), ЦСП (цементно-стружечная плита), ДСП (древесно-стружечная плита), ДВП (древесно-волокнистая плита), фанера, фибролит и многие другие. Рассмотрим некоторые из них:

– ориентированно-стружечная плита (ОСП или OSB-плита, oriented strand board) представляет собой многослойные листы, которые состоят из склеенных различными синтетическими смолами и добавками древесной щепы (возможно использование стружки);

– цементно-стружечная плита (ЦСП) относительной новый строительный материал, в состав которого входит портландцемент, древесная стружка, модификаторы и вода. Такой материал благодаря цементу хорошо сопротивляется проникновению влаги и воспламенению, а древесная стружка не дает растрескиваться плите при морозе и жаре;

– древесно-полимерный композит (ДПК) представляет собой материал, который могут получать различной конфигурации и размеров, так как расплавляется в специальных установках – экструдерах, после чего выдавливается через профильные насадки. В состав композита входят измельченные древесные отходы (древесная мука), полимер низкого давления, красители и добавки, последние из которых позволяют увеличивать влагонепроницаемость и прочность;

– древесно-волокнистая плита (ДВП) производится путем прессования из измельченного древесного волокна до необходимой фракции, дополненного смолами и наполнителями (например, костра льна). Такие плиты могут иметь разную плотность, а, следовательно, и область применения также разнообразна. Частое применение древесно-волокнистые плиты имеют в качестве теплоизоляционного материала.

На современном рынке представлен весьма широкий ассортимент строительных материалов на основе древесных отходов, однако и потребность в новых эффективных и доступных по ценам технологиях постоянно растет. Так, согласно [1], на базе кафедры «Переработка древесных материалов» Казанского национального исследовательского технологического университета разработана технология переработки древесных отходов с получением высокоэффективных материалов. В основе производства используется древесный наполнитель, который предварительно подвергают паровой обработке при температуре 250 ºС. Древесина, прошедшая термическую обработку при высоких температурах (100–200 ºС), называется термически модифицированной, или термической древесиной. Подвергнутая высокотемпературной обработке древесина становится более прочной и долговечной. Она устойчива к влаге, не гниет и не боится перепадов температур. Служит термодревесина на 7–10 лет больше обычной: не рассыхается, не боится влаги, не гниет, не теряет внешний вид.
Физико-механические характеристики древесно-наполненных композиционных материалов в качестве конструкционного материала не всегда удовлетворяют необходимым требованиям по прочности. Но, согласно [1], была предложена технология производства арболита, в котором предварительно высушенные древесные частицы, выступающие в роли заполнителя, перед обработкой в разрядной камере проходят термическое модифицирование контактно-конвективным способом в среде топочных газов без доступа кислорода воздуха при температуре 190–200 ºС в течение 50–60 мин, что позволяет снизить гигроскопичность древесных частиц, соответственно препятствует развитию давления набухания в процессе эксплуатации и, как следствие, улучшает эксплуатационные свойства арболита. Зависимость прочности легкого бетона от температуры обработки древесного заполнителя приведена на рисунке 1.

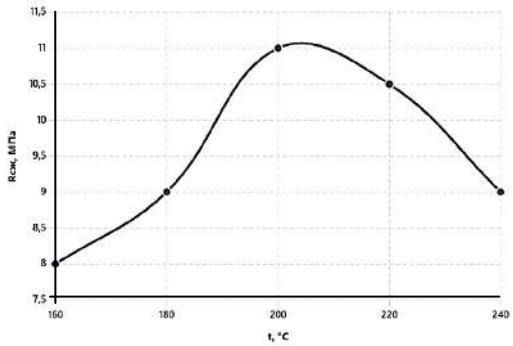


Рисунок 1 – Кривая изменения предела прочности на сжатие
в зависимости от температуры обработки древесного наполнителя

Таким образом, применение термодревесины в качестве заполнителя и наполнителя при изготовлении материалов может способствовать увеличению срока эксплуатации, в том числе в агрессивный для нее среде, что способствует увеличению перерабатываемой продукции вторичных ресурсов.

Список литературы

1 Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов / Р. Г. Сафин, В. В. Степанов, Э. Р. Хайруллина [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-stroitelnye-kompozitsionnye-materialy-na-osnove-drevesnyh-othodov/viewer (дата обращения: 04.09.2026).

2 ОКРБ 021-2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь» : утв. постановлением М-ва природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 9 дек. 2019 г. № 3-Т. – URL: www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2023/11/021-2019.pdf (дата обращения: 09.09.2026).

СОДЕРЖАНИЕ

Приветствие участникам конференции ... 3

1 БЕЗОПАСНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Научное и педагогическое наследие профессора В. П. Ярошевича ... 4
Гаев Д. А., Петрусевич В. В. Человеческий фактор и современные технологии как ключевые элементы безопасности на транспорте ... 5
Гилевский Е. Л., Асадчий А. А., Петрусевич В. В. Безопасность железнодорожного транспорта Беларуси: вызовы и решения ... 6
Гончарова Д. М. Современные методы диагностики и мониторинга состояния автомобильных дорог как основа обеспечения безопасности ... 8
Жлоба Д. Ф., Терещенко Е. А. Развитие теоретических основ обеспечения безопасности при организации местной работы железнодорожных узлов в условиях цифровизации ... 9
Иванов С. В. Типовые неисправности электрооборудования на современных пожарных автолестницах ... 12
Иноземцева Н. В., Лискович М. И. Анализ динамических нагрузок, действующих на вагон при погрузке ... 14
Истомин С. Г., Доманов К. И., Шатохин А. П., Денисов И. Н. Современные методы машинного обучения для распознавания объектов на железнодорожном транспорте ... 16
Кацубо П. А., Гапеев Н. С. Перспективы внедрения СВЧ-технологий в дорожные покрытия ... 18
Козлов В. Г. Геопространственный анализ распределения грузопотоков в транспортной сети ... 20
Кос О. И., Смирнов В. Ю. Классификация элементов сложной технической системы по их влиянию на надежность системы ... 22
Лисогурский О. Н. Параметрическое описание железнодорожной сети в задачах планирования и анализа вагоно- и поездопотоков ... 24
Листопад А. И., Вишневский Р. А. Закономерности высотного распределения беспилотных летательных аппаратов в воздушном пространстве города ... 27
Листопад А. И., Швайко Е. П. Обслуживание маршрутных полетов воздушных судов на малых высотах с применением фразеологии радиообмена на английском языке ... 29
Лях А. С., Зинченко Я. А., Кузнецов В. К., Петрусевич В. В. Инновации и вызовы: обеспечение безопасности транспортных систем в условиях современных угроз ... 31
Малахова Т. А. Возможности применения искусственного интеллекта при перестроении графика движения поездов ... 32
Минаков В. А. Способ информирования локомотивных бригад о показаниях маневровых светофоров на основе беспроводной передачи данных ... 34
Мордас М. С., Акулич Н. М. Влияние полимерно-битумных вяжущих на коэффициент сцепления ... 36
Морозов А. А. Системы безопасности электротранспорта: современные тенденции развития ... 37
Пожарицкий А. Н., Змушко И. А., Килочицкая М. А. Техосмотр в Японии как инструмент обеспечения безопасности транспорта и возможность адаптации опыта в Республике Беларусь ... 39
Репешко Н. А., Чеботарев В. В., Степовая А. И., Говоруха С. С. Человеческий фактор в системе безопасности железнодорожного движения и пути минимизации рисков ... 41
Саввина Е. А., Васечкин В. М. Автоматизация контроля вагонного парка на основе систем распознавания маркировки ... 43
Сакович М. В., Крук М. В., Петрусевич В. В. Комплексный подход к обеспечению безопасности воздушного пространства над объектами дорожно-транспортной инфраструктуры ... 48
Смирнов В. Ю., Артёмов А. Ю., Господинова С. М. Применение нейронных сетей для автоматического распознавания дефектов колесных пар ... 50
Сорокин А. Е. Оценка рисков и вероятности идентификации препятствий системами искусственного интеллекта трамвайных вагонов ... 52
Страдомская А. А. Обеспечение технологической безопасности и устойчивости перевозочного процесса при назначении локомотивов грузового движения ... 54
Страдомский М. Ю., Терещенко О. А., Науменко А. А. Оценка уровня обеспечения безопасности движения поездов методом факторного анализа ... 56

Сунь Ин, Языков М. Д., Бабайцев А. В. Особенности моделирования каплеударной эрозии 57
Удавцова Е. Ю., Кондашов А. А., Бобринев Е. В. Исследование динамических характеристик показателей безопасности дорожного движения в Российской Федерации 58
Филатов Е. А. Оценка качества конструкций стрелочных горловин 60
Шкурин К. М., Шкурин М. И. Обеспечение безопасности перевозочного процесса на основе использования системного подхода к управлению 62

2 БЕЗОПАСНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Вениамин Иванович Сенько: ученый, педагог, созидатель 66
Акулова Е. М. Влияние вибраций и динамических нагрузок от контакта колеса с рельсом на привод подвижного состава 67
Антюхин Г. Г., Силюта А. Г., Абдоян М. А., Чернышев П. В., Кунат Р. М. Подходы АО «ВНИИЖТ» и DB SYSTEMTECHNIK к улучшению технического состояния и повышения надежности локомотивов и пути их реализации 69
Афанаськов П. М., Комиссаров В. В., Белогуб В. В. Исследование статической и усталостной прочности колеса электропоезда Stadler Flirt 71
Бобрицкий С. М. О расчётной оценке динамических нагрузок на несущие конструкции крытых грузовых вагонов 73
Буйленков П. М., Скороходов С. А. К вопросу конкретизации методики тарировки тележек грузовых вагонов для определения коэффициента вертикальной динамики необрессоренных масс при проведении ходовых динамических испытаний 75
Бурченков В. В., Коленчиков А. В., Крот П. А. Повышение эффективности комплексного контроля технического состояния подвижного состава в движении 77
Гегедеш М. Г., Ворожун А. В., Маркавцов А. А. Применение искусственного интеллекта при создании цифровых двойников грузовых вагонов и контейнеров 80
Гучинский Р. В. Снижение массы рамы кузова вагона электропоезда 82
Демьянчук О. В. Обтекание потоком воздуха состава из нескольких загруженных контейнерами вагонов-платформ 84
Евдасёв И. С., Гуленков Е. Н. Анализ требований к выбору модульных автоматических выключателей по критерию отключения при однофазном коротком замыкании 86
Емельянова К. А., Чернин Р. И., Пастухов М. И., Афанаськов П. М., Коновалов Е. Н. Оптимизация сроков службы пассажирских тележек на основе статистического анализа 89
Жолнерович А. В., Кондратьева Н. А. Целесообразность внедрения систем беспилотного управления при эксплуатации железнодорожного транспорта 91
Зайчик В. С., Кебиков А. А., Перекрестова Н. М. Особенности подтверждения соответствия железнодорожной продукции с использованием обоснования безопасности 93
Захарова Г. Д. Виброакустические нагрузки зубчатых передач приводов железнодорожного подвижного состава 94
Исаев А. В., Полякова А. С., Худякова О. Н. О методах расчёта остановочных путей подвижного состава в железодорожно-транспортных экспетризах 96
Коленчиков А. В., Рудов П. К. Особенности управления тормозами дизель-поездов серий ДР1А, ДР1Б при следовании со вспомогательным локомотивом 98
Колотай Д. А., Андриевский А. Г., Чабан Е. А. Особенности эксплуатации кожуха зубчатой передачи электровоза 100
Комиссаров В. В., Лапушкин А. С. Расчетно-экспериментальная методика оценки фактического предела выносливости трамвайных осей 102
Комиссаров В. В., Таранова Е. С. Оценка предела выносливости методом «лестницы» по результатам испытаний стали марки ОсЛ для трамвайных осей 103
Котов А. В., Кроль Д. Г. К вопросу о разработке математической модели рычажной передачи тормозной системы железнодорожного вагона 104
Кущенкова Л. С. Конструкции скоростных платформ 106
Мирош Д. В., Галушко В. Н. Реализация метода обнаружения короткозамкнутых витков в обмотке асинхронного электродвигателя 109
Неверов А. С., Доценко Е. И. Электропластический эффект как один из факторов, влияющих на надёжность систем электроснабжения подвижного состава 110
Огородников Л. В., Сенько Н. С. Оценка прочности и остаточного ресурса рамы тележки электропоезда ЭР9 с учетом длительной эксплуатации 112

Остриков О. М. О различии величин плотности двойникующих дислокаций на границах остаточных и упругих механических двойников 113
Остриков В. О., Остриков О. М. Постановка статической задачи механики для жесткозакрепленного ферромагнитного кристалла с памятью формы с непараллельными границами раздела аустенит/мартенсит, находящегося под действием магнитного поля 115
Отока А. Г., Холодилов О. В. Модернизация технологических процессов иммерсионного ультразвукового контроля колесных пар на базе существующих стендов СДВК (СУДКП) 117
Отока А. Г., Холодилов О. В., Короткевич И. П. Особенности магнитопорошкового контроля свободных осей колесных пар железнодорожного подвижного состава 122
Отока А. Г., Холодилов О. В., Чепик Д. Л. Подконтрольная эксплуатация мобильной насосной станции для магнитопорошкового контроля деталей вагонов 125
Отока А. Г., Холодилов О. В., Чепик Д. Л., Косарев А. Р. Разработка конструкции зонда для ультразвуковой дефектоскопии полых осей подвижного состава 128
Пастухов М. И., Коновалов Е. Н., Чернин Р. И., Афанаськов П. М., Емельянова К. А. Оценка несущей способности тележек пассажирских вагонов (рам и надрессорных балок) после длительной эксплуатации 132
Пигунов В. В., Пигунов А. В. Оценка обоснованности назначенных показателей надежности ходовых частей вагонов 134
Пигунов А. В., Пигунов В. В., Скороходов С. А. Виртуальные и натурные испытания крышек люков полувагонов 136
Путято А. В., Гегедеш М. Г. Систематизация нагрузок, действующих на грузовые вагоны в процессе эксплуатации 138
Разон В. Ф., Бурченков В. В. К вопросу о рациональных сроках службы грузовых вагонов 140
Разон В. Ф., Бурченков В. В. К вопросу о нормативных сроках плановых видов ремонта грузовых вагонов 141
Саттаров А. А. Эволюция электромобилей 145
Сахаров П. А. Оценка влияния неоднородности массы состава на продольные силы в межвагонных соединениях грузовых поездов 147
Торопов М. Н., Васильев Н. В. О путях повышения ресурса систем охлаждения и водотеплоснабжения подвижного состава и ремонтных предприятий 149
Третьяк З. Ю., Альховская Е. М., Перекрестова Н. М. Определение требований безопасности к осям колесных пар железнодорожного подвижного состава 151
Турсунов Н. К., Уразбаев Т. Т. Термодинамические основы рафинирования железоуглеродистых расплавов при производстве литых деталей железнодорожного подвижного состава 153
Турсунов Н. К., Уразбаев Т. Т. Гидродинамика донной продувки аргоном стального расплава при производстве литых деталей железнодорожного подвижного состава 155
Турсунов Н. К., Уразбаев Т. Т. Управление процессом модифицирования металлического расплава комплексными модификаторами на основе неразрушающего контроля литых деталей железнодорожного подвижного состава 157
Чаганова О. С. Анализ динамики взаимодействия тяжеловесного груза с вагоном при неблагоприятных погодных условиях 160
Чернин Р. И., Моисейчикова О. М. Результаты исследований по снижению величины натяга прессовых соединений колёсных пар в эксплуатации на основе компьютерного моделирования 162
Чэнь Цзиньтао. Метод диагностики неисправностей подшипников буксовых узлов фитинговых платформ на основе комплексного анализа вибрационных и температурных измерений 163
Шатило С. Н. Пожарная безопасность межвагонного перехода современных электропоездов 165
Шимановский А. О., Кракова И. Е., Цыганок О. И. Анализ устойчивости транспортного средства при перевозке тяжеловесного груза 167
Щербаков С. С., Комиссаров В. В., Турсунов Н. К. Влияние аустенитно-бейнитной структуры на трибофатическую стойкость высокопрочного чугуна с шаровидным графитом 169
Щербаков С. С., Комиссаров В. В., Турсунов Н. К. Комплексный анализ трибологических и усталостных свойств специальных высокопрочных чугунов с шаровидным графитом для трибофатических систем.. 171

3 ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ

Афанасьева Н. С., Елизаров Д. А., Гнидко К. О. Математическая модель входного вектора значимых признаков детектирования автоматизированных средств подмены пользователя в информационной среде. 173
Бочков К. А., Медведев Д. Д. Влияние разброса параметров аппаратуры на выполнение основных режимов работы тональной рельсовой цепи 175
Бочков К. А., Харлап С. Н., Литвинов Е. П. Перспективы развития программного комплекса автоматизации проведения FMECA-анализа систем ЖАТ в части имитации отказов электронных компонентов 176

Громыко И. Л., Галушко В. Н., Савицкая В. В. Разработка прибора для обнаружения короткозамкнутых витков и обрывов в обмотках электрических машин 178
Елизаров Д. А., Орловский Е. П. Разработка браузерного расширения для детектирования веб-ботов 180
Ефанов Д. В. Особенности синтеза самопроверяемых дискретных устройств на основе логической коррекции сигналов и кодов Бордена 181
Ефанов Д. В. Применение равновесного кода «3 из 6» при синтезе самопроверяемых дискретных устройств 183
Ефанов Д. В. Формирование разделимого равномерного кода с учетом особенностей структур объектов диагностирования для синтеза самопроверяемых дискретных устройств 186
Жигалин И. О., Медведев Д. Д., Яцушко Е. В. Определение параметров электростатического разряда по спектрально-энергетическим условиям эквивалентности импульсов помех 188
Калач А. В., Саввина Е. А., Васечкин В. М. Распознавание маркировки вагонов в условиях динамических помех методом нейроиммунной классификации 190
Каменский В. В. Принципы построения систем реализации ответственных команд на железнодорожных станциях 193
Комнатный Д. В. Расчет экранированных печатных плат методом граничных элементов 195
Комнатный Д. В. Численный расчет диэлектрического барьера для защиты микроэлектронной аппаратуры СЖАТ от электростатических разрядов 197
Корниенко К. И., Шапекин А. Е. Надежность систем навигации на станции Челябинск-Главный 199
Маланин П. А., Кущенкова Л. С. Развитие средств автоматизации технического обслуживания устройств СЦБ на базе системы АДК-СЦБ 201
Медведев Д. Д. Требования к цифровой модели тональной рельсовой цепи с точки зрения обеспечения функциональной безопасности 204
Осипова Н. Р., Репешко Н. А., Куделина А. О. К вопросу устойчивости цифрового человеко-машинного контура в транспортном производстве 206
Рязанцева Н. В., Якубович Д. В., Голдобина Т. А. Обеспечение информационной безопасности интеллектуальных ассистентов на основе больших языковых моделей в системах поддержки диспетчерского персонала 208
Соколов М. М. Определение параметров четырехполюсника схемы замещения трансформатора ПРТ-А 210
Соколов М. М. Построение номограмм областей входных сопротивлений участка железнодорожного пути 212
Трунаев А. М., Кожадеев Д. Ю., Федорова О. С. Разработка интерфейса интерактивной обучающей системы для изучения дисциплины «Автоматика и телемеханика на перегонах» 214
Трунаев А. М., Федорова О. С. Механизм оперативной актуализации исполнительной документации устройств СЦБ в условиях непрерывной эксплуатации 216
Харлап С. Н. Метод оценки охвата диагностикой сложных программируемых подсистем при выполнении расчетов показателей функциональной безопасности 218
Харлап С. Н., Медведев Д. Д., Жигалин И. О. Метод оптимизации определения β-фактора при выполнении оценки отказов по общей причине 220
Харлап С. Н., Минин В. Е., Киселева С. В. Базовый программный комплекс студенческой лаборатории кибербезопасности 222
Швалов В. Д. Методы обработки данных о техническом состоянии устройств железнодорожной автоматики и телемеханики 224
Швалов Д. В., Выгриянова В. А. Принципы построения цифровых двойников схем электрической централизации 226
Шевченко Д. Н. Методика построения системы безопасности из компонентов, сертифицированных по другим стандартам функциональной безопасности 228
Шевченко Д. Н. Размерность метрики PMHF стандарта ISO 26262 229

4 ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Апоник А. А. Оптимизация назначения треков в NAT OTS для снижения топливных затрат 232
Ахраменко Н. А. Экологически чистый транспорт и потенциал велосипедного движения в условиях загазованности современных городов 234
Ахраменко Н. А., Павленко А. П. Эффективность электровелосипедов 235
Ахраменко П. Г. Воздействие добычи полезных ископаемых в Республике Беларусь на экологию и пути решения этой проблемы 238
Басыров В. С. Интеллектуальные методы прогнозирования электропотребления на железнодорожном транспорте и зависимость их точности от качества первичных измерений 240
Бухаров С. Н., Тулейко А. С., Кожушко В. В. Звукопоглощающие метаматериалы для обеспечения шумовой безопасности транспорта 242

Вербицкий П. С. Инновационные разработки в области звукоизоляции с использованием вторичного сырья ... 244
Галушко В. Н., Громыко И. Л., Савицкая В. В. Студенческие научные разработки приборов для диагностики обмоток электрических машин и трансформаторов ... 245
Галушко В. Н., Можаев С. А. Методика диагностики бесколлекторного двигателя постоянного тока ... 247
Дударева А. В. Исследование технологий очистки газовых выбросов от диоксида серы в атмосферный воздух от стационарных источников ... 249
Ефимчик К. В., Кудина Е. Ф. Экологически безопасные композиционные материалы на основе геомодифицированных полиолефинов ... 251
Кудина Е. Ф., Приходько И. В., Турсунов Н. К., Капитанов Д. С. Структурно-организованные материалы на основе многокомпонентных матриц со специальными свойствами ... 253
Кунат Р. М. Оценка затрат мощности на привод вспомогательного оборудования тепловозов в эксплуатации ... 255
Ликсина Д. И., Либертович Д. С. Зеленая логистика: снижение углеродного следа при грузоперевозках ... 257
Ляхов С. В., Гончаров И. П. Вопросы потребления котельно-печного топлива в организациях Минтранса ... 259
Макеев В. В., Рыбина Т. М., Семёнов И. П., Макеева П. В. Метод контроля тестовых шумов для персонифицированного подбора средств индивидуальной защиты органов слуха работников железнодорожного транспорта ... 261
Матвейчикова В. С., Янковец Я. В., Худенко К. И., Васильев А. А. Геополимерный бетон – один из способов снижения уровня экологических проблем ... 264
Медведева Е. В., Терзи Д. Проблема углеродного следа на примере Республики Беларусь и других стран ЕАЭС ... 266
Мягков Д. Ю. Организационные и инженерно-технические мероприятия по охране окружающей среды на аэродроме ... 269
Овчинников В. М., Макеев В. В. Развитие электрификации в Беларуси ... 271
Рябина Д. И. Экологические последствия шумового воздействия железнодорожного транспорта на прилегающие магистральные биоценозы ... 273
Савич В. В., Тарайкович А. М., Голодок Р. П., Вербицкий Д. Ю., Кузнечик О. О., Петюшик Е. Е. Энергосбережение в порошковой металлургии ... 275
Саттаров А. А. Экологически чистые пористые проницаемые материалы, полученные методом введения мелких порошков в пористую заготовку из кипящего слоя с применением вибраций ... 279
Тулейко А. С., Бухаров С. Н., Кожушко В. В., Кудина Е. Ф. Экспериментальная оптимизация акустических характеристик композитов методом экстремальных вершинных точек ... 280
Юницкий А. Э., Артюшевский С. В. Удельные выбросы парниковых газов наземных транспортных комплексов ... 282

5 БЕЗОПАСНОСТЬ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Алексеев Ю. Г., Лю Тингоу, Ли Чжуньюй, Цин Чжан, Чанфэн Хао, Дехуа Хоу. Композитные материалы в технологиях холодной регенерации дорожных одежд ... 285
Алимова Н. Ю., Максимович В. В. Оценка безопасности узловых элементов транспортной развязки ... 287
Алмабеков В. А., Белявская Ю. Н. Обоснование эффективности применения самовосстанавливающегося асфальтобетона для повышения долговечности дорожных покрытий ... 289
Афанасенко А. А. Структурная стабилизация битумо-минеральной мастики в щебеночно-мастичном асфальтобетоне ... 290
Афанасенко А. А., Яцевич П. П. Углеродные наноматериалы как структурные модификаторы полимерно-битумных вяжущих ... 292
Ахраменко Г. В. Адаптация дорожной инфраструктуры к экстремальным климатическим воздействиям: подходы к проектированию и содержанию ... 294
Ахраменко Г. В., Ахраменко П. Г. Анализ влияния новых материалов для дорожных одежд на экологию: оценка рисков и перспективы применения ... 296
Ахраменко Г. В., Солохин Н. А. Обеспечение безопасности дорожного движения при проведении работ по капитальному ремонту автомобильной дороги ... 298
Бандюк Н. В., Васильев А. А. Факторы, определяющие ровность проезжей части автомобильных дорог ... 300
Бородин И.С. Обеспечение безопасности дорожного движения в темное время суток средствами освещения ... 301
Брель Д. А. Повышение надежности и долговечности цементобетонного покрытия на участке реконструкции автомобильной дороги М-10 ... 303
Будько М. В., Шкабара Н. Н., Янучок А. А. Особенности капитального ремонта местных автомобильных дорог 305
Ващенко А. В. Особенности строительства автомобильной дороги на слабом основании ... 307
Гараев Р. Р., Семенюк А. В. Предложения по внедрению на полигоне Горьковской железной дороги беспилотных летательных аппаратов для выполнения полевых работ по борьбе с нежелательной растительностью ... 309

Гегедеш М. Г., Комаровский Н. В., Столяров А. И. Анализ напряженно-деформированного состояния рельсовых накладок при сочетанных стандартных нагрузках 315
Гладышева О. В., Бончева Е. А., Миронова Е. В., Оганесян А. Р. Снегозащитные сооружения с применением сеток на полимерной основе 317
Гордон В. А. Определение вынужденных колебаний балки, лежащей на упругом основании, при внезапном изменении изгибной жёсткости 319
Гордон В. А., Семёнова Г. А. Математическая модель балки частично опертой на упругое основание 321
Давыдчик И.М., Бондаренко А.А. Процессы текущего ремонта с применением литых асфальтобетонных смесей 323
Довгелюк Н. В., Масловская Е. М., Бараболкин П. Н. Повышение скорости движения поездов за счет изменения трассы, продольного профиля и плана железнодорожной линии 325
Довгелюк Н. В., Масловская Е. М., Трушко И. С. Влияние провозной способности на основные технические параметры железной дороги 327
Дралова И. П., Никитенко М. Ю., Сырова Н. С. Инженерно-геодезические изыскания отраслевых объектов. 329
Жуковский Е. М., Кравченко С. Е. Обеспечение надёжности дорожных одежд на основе вероятностного проектирования и ресурсосберегающих технологий 331
Заграничек К. Л., Сухов А. В., Савин А. В., Светозарова И. В. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния изолирующих рельсовых стыков 333
Касперович Н. И., Шебзухов Ю. А., Гаранин В. Н., Городник С. А. Организационная устойчивость научно-инжиниринговых организаций как фактор безопасности транспортной инфраструктуры 335
Кондрашин Е. А. Применение цифровых технологий для повышения безопасности при строительстве автомобильных дорог 337
Кононович Л. П. Оптимизация содержания кривых участков железнодорожного пути с применением BIM 339
Корик С. В., Ковтун П. В. Анализ путевого хозяйства Белорусской железной дороги, задачи и пути их решения 341
Корончик А. В., Афанасенко А. А. Современные тенденции развития безопасности и эффективности асфальтобетонных дорожных покрытий 342
Корончик А. В., Гуриненко Н. С. Повышение безопасности и долговечности дорожных покрытий за счет модификации цементного бетона отходами водоподготовки 344
Корончик А. В., Жуковский Е. М. Повышение эксплуатационной надежности местных проездов и подъездных дорог путем устройства усовершенствованных обочин на основе нефтешламовых смесей 346
Кравченко С. Е., Яцевич П. П., Афанасенко А. А. Цветной асфальт на нефтяных битумах для городской инфраструктуры 348
Курбонов С. З. Фундаментальные исследования устойчивости щебёночно-мастичного асфальтобетона на основе местной стабилизирующей добавки, армированной базальтовым волокном, к колееобразованию 350
Кучинская А. А. Холодный ресайклинг как ресурсосберегающая технология восстановления дорожных покрытий 352
Ладышев А. В. Деформационное поведение и сдвигоустойчивость асфальтобетона при высоких температурах 354
Лапушкин А. С. Возможности применения зарубежных стандартов серии EN 13232 при организации высокоскоростного движения на железнодорожном пути колеи 1520 мм 355
Листратенко П. А., Царенков А. А. Совершенствование обустройства объектов сервиса при развитии дорожной сети: монолитные резиновые покрытия 357
Лобанов В. Л. Исследование причин образования дефектов асфальтобетонного покрытия 359
Лыгановский Д. В., Шипилев А. С., Печенев Е. В., Биндюк С. А., Дашук К. Д. Применение беспилотных летательных аппаратов в путевом хозяйстве 361
Масловская Е. М., Довгелюк Н. В., Кононович Л. П. Анализ геометрии плана железнодорожной линии и ограничений скорости движения поездов 363
Митьков В. Л., Алмабеков В. А., Царенкова И. М. Устройство и герметизация сопряжения цементобетонного и асфальтобетонного покрытий автомобильных дорог 365
Михальков А. О., Грищенков Я. М., Петрусевич В. В. Разработка интеллектуальной системы прогнозирования долговечности автомобильных мостов на основе анализа эксплуатационных факторов 367
Никитенко М. Ю. Технологические решения по обеспечению безопасности при ликвидации малодеятельных раздельных пунктов 369
Никитенко М. Ю., Сырова Н. С., Дралова И. П. Применение современных геодезических технологий и приборного контроля для обеспечения безопасности при реконструкции электрических сетей 371
Никитин Е. А., Ахраменко Г. В. Текущий ремонт автомобильных дорог с выбором оптимальной формы нарезки «карт» при ликвидации выбоин 373

Никитин Е. В., Ковтун П. В. Увеличение скоростей движения поездов на полигоне Белорусской железной дороги ... 375
Петрусевич В. В., Томашов В. В., Грищенков Я. М., Михальков А. О. Концепция способа управления распределением жидких дорожно-строительных материалов ... 377
Поддубный А. А., Ефимчик К. В., Абраменко А. А. Применение композиционного песчано-полимерного материала конструкционного назначения для изготовления дорожной плитки и оборудования придомовых территорий ... 379
Поддубный А. А., Никитенко М. Ю., Поддубный П. А., Чикезов К. В. Обзор существующих решений мониторинга состояния мостовых сооружений в Республике Беларусь и Российской Федерации ... 381
Ремез Н. И. Анализ эффективности элементов пассивной безопасности магистральных трасс в зонах массивных препятствий ... 385
Романенко В. В. Определение области рационального применения составных деревянных шпал ... 387
Романенко В. В. Применение статистического анализа при математическом моделировании ... 389
Романенко В. В., Берней Р. П., Чеканов П. Д. Совершенствование расчетов рихтовки железнодорожных кривых средствами автоматизации ... 391
Романенко В. В., Власенко А. О. Анализ существующих конструкций составных деревянных шпал с позиции максимального вовлечения короткомерных обрезков ... 393
Романенко В. В., Кураш А. В., Кравцов З. М. Учет местных условий при оптимизации технологических процессов ремонта железнодорожного пути ... 395
Сазанчук Э. П., Ремез Н. И. Оптимизация конструктивных элементов фронтальных дорожных ограждений ... 397
Свибович М. В., Ахраменко Г. В. Реконструкция улицы с разработкой мероприятий по укреплению оснований с применением геосинтетических материалов ... 399
Соколов М. М. Применение PYTHON для оценки изменения входного сопротивления участка железнодорожного пути при изломе рельса ... 401
Солохин Н. А. Капитальный ремонт автомобильных дорог и его влияние на аварийность: методы оценки и повышения эффективности ... 403
Сырова Н. С., Дралова И. П., Никитенко М. Ю. Комплекс инженерно-геодезических работ по прокладке волоконно-оптической линии для обеспечения безопасности движения поездов ... 405
Угрин Д. М. Об организации контроля за техническим состоянием объектов инфраструктуры государственного объединения «Белорусская железная дорога» ... 406
Фролова Т. М., Листратенко П. А., Пофтальный П. В. Применение вторичных материальных ресурсов для обеспечения долговечности дорожных конструкций в условиях циркулярной экономики ... 407
Царенкова И. М., Ковалев И. Ю. Совершенствование эксплуатации автомобильных дорог в зимний период ... 409
Царенкова И. М., Пофтальный П. В., Фролова Т. М. Актуальные направления эколого-экономической оптимизации технологии устройства дорожных одежд ... 411
Шебзухов Ю. А., Гаранин В. Н. Оценка предельного технического состояния анкерных узлов рельсострунных эстакад uST при прогрессирующем локальном повреждении ... 413
Якимчик Т. С., Ковтун П. В., Сороговец В. А., Терех А. В. Особенности эксплуатации железнодорожных кривых малого радиуса ... 415
Яcько Д. В., Царенкова И. М. Комплексные интеллектуальные системы безопасности дорожного движения на участках миграции диких животных ... 416
Яцевич П. П. Модификация асфальтобетонных смесей как фактор повышения безопасности транспортной инфраструктуры ... 418

6 НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Ананич В. Н., Семченко Н. И. Основные архитектурные методы, улучшающие ориентацию в пространстве пожилых людей с когнитивными нарушениями ... 420
Астрелина А. В. Методика оценки стоимости жизненного цикла строительных объектов как инструмент реализации ГНТП «Инновационные технологии в строительстве» на 2026–2030 годы ... 422
Атрошко Е. К., Дралова И. П. Установка подкрановых путей мостовых кранов геодезическим способом ... 424
Бабаскин Ю. Г. Повышение надежности дорожных конструкций ... 425
Беспалова М. В., Ахмедзаде К. Л. Сравнительный анализ методов устройства искусственного основания под жилой дом в г. Гомеле в сложных грунтовых условиях ... 427
Борисенко И. А., Чернюк Н. В. Техническое регулирование и безопасность применения теплоизоляционных панелей в современных зданиях ... 431
Васильев К. Е., Прасол В. М. Анализ возможностей искусственного интеллекта для задач строительства транспортной инфраструктуры ... 433
Верещагин К. В. Оценка вибрационной надежности элементов транспортных конструкций при различных условиях закрепления ... 435

Гриб А. А. Оценка влияния нитчатых форм бактерий на структуру активного ила 436
Гробок А. В., Шутов Д. С., Латун М. В., Васильев А. А Растворные составы с регулируемым коэффициентом линейного температурного расширения 438
Громыко В. Г., Яровая А. В. Технико-экономическое сравнение открытого и скрытого деформационного шва в жилых домах 439
Дорошенко А. В. История и современные тенденции развития производства асбестовых материалов в строительной индустрии 441
Живица Е. Л., Захаренко З. Н. Управление материально-техническим обеспечением через призму диаграммы Ганта: от календаря к управлению потоками 443
Карамышев А. А. Цветовая реабилитация визуальной среды 445
Кликунов К. А., Болтунов Н. А., Прасол В. М. Критический регионализм как инструмент сохранения архитектурной идентичности в условиях глобализации 447
Ковгар И. А. Сравнительный технико-экономический анализ кровельных покрытий 449
Ковгар И. А. Стеклянная черепица: исторические прототипы и генезис идеи прозрачной кровли. Нормативное регулирование в Республике Беларусь 451
Коновалова О. Н., Нестерова А. В., Горбунова А. С. Проблемы применения BIM-технологий на всех этапах жизненного цикла проекта, влияющих на надежность объекта 453
Конышко В. А. Применение наномодификаторов для бетонов на объектах транспорта 456
Конышко В. А., Яшина Т. В. Анализ эффективности наномодифицированных бетонов для транспортного строительства 459
Королёв О. А., Талецкий В. В. Изменение расчетной схемы поперечной рамы каркаса сборного железобетонного коровника 461
Курак А. В., Захаренко З. Н. Оценка экономической эффективности строительства и эксплуатации многоквартирных домов с применением энергоэффективных технологий 462
Левчук Д. С., Степанова А. В. Обоснование конструктивных решений кровли для реконструируемого лечебно-оздоровительного комплекса 464
Музыченко Д. С., Пантюхов О. Е. Инновационные методы применения модульных систем при монтаже инженерных сетей 466
Муравьева Ю. В. Применение BIM-технологий при проектировании наружных сетей канализации 468
Новик А. Д., Туровец А. С., Прасол В. М. Жилая архитектура и комфорт 470
Новикова О. К., Папков А. В. Инженерные аспекты эксплуатации и модернизации систем водоотведения малых населенных пунктов Гомельского района 472
Новицкий Д. П., Беспалова М. В. Методы усиления ленточных фундаментов при реконструкции зданий 474
Папков А. В. Анализ эксплуатационных проблем и перспективные направления модернизации систем водоотведения малых населенных пунктов 476
Папков А. В. Рекомендации по модернизации систем водоотведения малых населенных пунктов 479
Патрикеева А. В., Ташкинов А. Г. Анализ путей повышения эффективности тепловых установок для ускоренного твердения бетона 481
Петровец П. А., Калугин И. А., Прасол В. М. Архитектура Китая. Истоки. Современность 483
Ратникова А. М., Салянко И. А. Взаимосвязь прочностных и гидравлических характеристик полимерных трубопроводов как основа проектирования водопроводных сетей 485
Сверж В. Ю., Медведева Е. В., Агеева К. Э., Васильев А. А. Анализ капиллярной пористости бетона класса по прочности на сжатие С20/25 для различных параметров бетонных смесей 487
Светлицкий Д. А., Чернюк Н. В. Анализ ползучести бетона с композитной арматурой 488
Семченко Н. И., Ковтун П. В. Синтез строительных технологий в реконструкции подземных коммуникаций 491
Середа Н. П. Модернизация повысительных насосных станций как фактор повышения надежности систем водоснабжения 492
Середа Н. П. Эксплуатационная надежность повысительных насосных станций систем водоснабжения 494
Сирош В. А., Довыденко Д. В. Расчёт железобетонной колонны в ПК ЛИРА-САПР и сравнение результатов с нормами Республики Беларусь 496
Соколовский В. А., Талецкий В. В. Сравнение вариантов усиления плит перекрытия с круглыми пустотами 499
Степаненко М. А., Ташкинов А. Г. Совершенствование режимов тепловлажностной обработки бетона 501
Стрижак Д. С., Довыденко Д. В. Расчёт железобетонной плиты перекрытия в программном комплексе «ЛИРА-САПР»: сопоставление результатов с нормами Республики Беларусь 503
Строган Н. А., Ходонович Н. Д., Шебушев А. В., Васильев А. А. Современные ремонтные составы для бетонных и железобетонных элементов и конструкций 505
Сураев В. А., Талецкий В. В. Вариант устройства подвального этажа бесподвального здания 507

Таранович Е. А., Степанова А. В. Сравнение методов усиления железобетонных балок при реконструкции школы ... 509
Ташкинов А. Г. Экономия ресурсов при изготовлении сборных железобетонных конструкций ... 511
Тимошков В. Ф. Особенности обеспечения пожарной безопасности при строительстве зданий и сооружений из металлических конструкций с горючими утеплителями ... 513
Титкова Т. С., Щеглова А. В. Архитектурные аспекты безопасности подземных пешеходных переходов в городской среде ... 514
Ткачева М. И. К вопросу определения скорости коррозии стальной арматуры в железобетоне ... 516
Токаренко Я. В., Прасол В. М. Звукоизоляционные системы в строительстве. Перехода от однослойных систем к многослойным ... 518
Тушинский М. Н., Степанова А. В. Технико-экономические обоснования выбора конструктивной схемы перекрытий при строительстве многоэтажного жилого дома ... 520
Ушакова А. В., Худенко К. И., Прасол В. М. Новая жизнь малых исторических городов ... 521
Черняков А. А., Талецкий В. В. Современные методы усиления каменных стен и простенков при реконструкции и ремонте зданий ... 524
Чижик М. Д. Сравнительный анализ современных гидроизоляционных составов для бетонных конструкций 526
Чижик М. Д., Яшина Т. В. Влияние современных гидроизоляционных составов на эксплуатационные характеристики бетона ... 528
Чугунова А. С. О возможности применения вторичных материальных ресурсов на основе органического происхождения в производстве материалов ... 531

Научно-практическое издание

ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ НА ТРАНСПОРТЕ

Материалы XV Международной научно-практической конференции,
посвященной пятилетке качества
(Гомель, 19–20 ноября 2026 г.)

Ч а с т ь 1

Издается в авторской редакции

Технический редактор *В. Н. Кучерова*
Корректоры: *А. А. Павлюченкова, Е. Г. Привалова, Д. В. Марцинкевич*
Компьютерная верстка: *Т. М. Маруняк, С. В. Ужанкова, Т. Л. Федькова*

Подписано в печать 11.11.2026 г. Формат 60×84$^{1}/_{8}$.
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 63,01. Уч.-изд. л. 61,35. Тираж 30 экз.
Зак. №. 1602. Изд. № 41.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/361 от 13.06.2014.
№ 2/104 от 01.04.2014.
№ 3/1583 от 14.11.2017.
Ул. Кирова, 34, 246653, Гомель

ISBN 978-985-891-286-4