629.45/.46
П 905

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

УДК 629.46

ПУТЯТО
Артур Владимирович

МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКЦИЙ ВАГОНОВ С УЧЕТОМ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПЕРЕВОЗИМЫМИ ГРУЗАМИ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

по специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Гомель, 2012

Работа выполнена в Учреждении образования «Белорусский государственный университет транспорта» (УО «БелГУТ»)

Научный консультант **Сенько Вениамин Иванович**, доктор технических наук, профессор, Заслуженный работник образования Республики Беларусь, ректор, УО «БелГУТ»

Официальные оппоненты: **Хохлов Александр Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте», Московский государственный университет путей сообщения

Кельрих Михаил Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство», Государственный экономико-технологический университет транспорта (г. Киев)

Василевич Юрий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сопротивление
алов машиностроительного профиля»,
сский национальный технический
ситет
**ственное научное учреждение
иненный институт машиностроения
еларуси»**

в 14:00 часов на заседании совета по
УО «БелГУТ» по адресу: 246653,

32)77-37-21, факс (232)95-36-89

я в научно-технической библиотеке

А. К. Головнич

629.45/.46
П 905

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспеченности железнодорожных перевозок подвижным составом в Республике Беларусь в настоящее время крайне актуальна, что связано со старением имеющихся вагонов и недостаточными объемами закупки нового подвижного состава, так как на это необходимы огромные валютные средства. Остро стоит и задача обеспечения вагоноремонтных предприятий сменными деталями и узлами, большая часть которых сегодня также является импортом для нашей республики. Следует отметить, что несмотря на достаточно высокие мощности предприятий вагоностроения России и Украины, подобная ситуация с дефицитом вагонов, а также обеспечением планового ремонта действующего подвижного состава складывается не только у нас в стране, но и на внешних рынках, что привело к необходимости организации множества новых вагоностроительных предприятий. Для обеспечения потребностей Республики Беларусь и освоения широкого внешнего рынка сбыта вагонов белорусским производителям необходимо создавать конкурентоспособный подвижной состав, проектирование и изготовление которого должно базироваться на применении современных инновационных технических решений и технологий.

Анализ действующей нормативной базы расчета и проектирования грузовых вагонов, которая уже более 15 лет не претерпевала существенных изменений, показал, что она не в полной мере учитывает реальное распределение силового нагружения кузовов от перевозимых грузов при переходных режимах движения. В частности, при выполнении прочностных расчетов вагонов, предназначенных для перевозки навалочных и сыпучих грузов, статическое и динамическое воздействие от последних определяется по зависимостям, полученным на основе классической теории Кулона, которые не позволяют учесть особенности реального распределения сил при экстремальных динамических режимах, сопровождающихся высокими градиентами ускорений (соударение вагонов, экстренное торможение и т. п.), а также распределения давления от груза при расчетах кузова вагона с поверхностями, имеющими переменный радиус кривизны (например, «каплевидный» профиль). При перевозке грузов наливом возможны большие перемещения жидкости относительно кузова, приводящие к повышенным гидродинамическим давлениям, а, следовательно, к изменению напряженно-деформированного состояния (НДС) вагона. Таким образом, не решенной является задача оценки НДС на основе учета реальных силовых нагружений металлоконструкции вагонов при взаимодействии с перевозимыми грузами, подвижными относительно кузова, и их учет при разработке новых перспективных конструкций вагонов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами. Тема диссертации соответствует п. 7.1 «Механика, надежность, безопасность и эко-

НАУЧНО-ТЕХНИЧ
БИБЛИОТ
Зак. 2198

логичность машин, трение и износ в машинах, методы расчета, моделирования, проектирования, конструирования и испытаний машин, агрегатов и узлов» Перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь 19.04.2010 г. № 585.

Работа выполнена в рамках следующих основных научно-технических программ и тем:

1 ГППИ «Новые компоненты в машиностроении». Задание 8.01. Разработка и обоснование комплекса технических предложений по совершенствованию конструкций грузового подвижного состава на основе результатов моделирования системы “транспортное средство – жидкость”, № ГР 20043669, 2003–2005 гг.

2 ГКПНИ «Механика 2.41». Развитие теоретических основ и разработка методов исследования динамики взаимодействия наливных и сыпучих грузов с металлоконструкциями, № ГР 20063108, 2006–2010 гг.

3 Проект Т07М-008 «Оценка прочностных и динамических характеристик элементов конструкций подвижного состава при динамических взаимодействиях», БРФФИ, № 20071681, 2007–2008 гг.

4 ГПНИ «Механика 1.16». Развитие научных основ и разработка методов определения прочностных и динамических характеристик взаимодействий в системе «транспортное средство – перевозимый груз – путь» с целью создания конкурентоспособного подвижного состава и повышения безопасности перевозок грузов, № ГР 20111887, 2011-2012 гг.

5 Государственная программа инновационного развития Республики Беларусь на 2011–2015 годы. Пункт № 91 «Создание испытательного центра продукции вагоностроения» Перечня важнейших проектов по созданию новых предприятий и производств, имеющих определяющее значение для инновационного развития Республики Беларусь.

6 «Провести исследование состояния и перспектив развития рынка железнодорожных перевозок и разработать проект программы развития Белорусской железной дороги до 2015 года с учетом обоснования потребностей в инвестициях». Договор № 5736 с Белорусской железной дорогой, 2009 г.

7 Ряд договоров на разработку конструкций, выполнение динамико-прочностных расчетов и испытаний вагонов с линейными предприятиями Белорусской железной дороги, ОАО «Белорусский автомобильный завод», СЗАО «Могилевский вагоностроительный завод», СЗАО «Осиповичский вагоностроительный завод» и др.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является создание методологии разработки конструкций вагонов, основанной на определении их напряженно-деформированного состояния с учетом силовых взаимодействий в системе «вагон – подвижный груз» («вагон – навалочный груз», «вагон – сыпучий груз», «вагон – наливной груз»).

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих основных задач:

– выявление закономерностей появления характерных эксплуатационных повреждений кузовов основных типов вагонов грузового подвижного состава, полученных на основе сбора и систематизации информации об их повреждаемости и техническом состоянии после длительной эксплуатации;

– создание многофакторных моделей основных типов грузового подвижного состава, адаптированных к оперативному варьированию параметрами, отражающими техническое состояние вагона и его нагруженность, для определения НДС их кузовов;

– разработка методов определения НДС кузовов вагонов с учетом их силового взаимодействия с перевозимыми грузами при варьировании физико-механическими характеристиками последних, уровня заполнения кузова грузом, технического состояния элементов конструкций кузова после длительной эксплуатации (например, потеря толщин элементов конструкций), а также особенностей внешнего силового нагружения;

– исследование НДС кузовов основных типов грузового подвижного состава с учетом силовых взаимодействий с перевозимыми грузами;

– теоретическое обоснование технических решений новых конструкций грузовых вагонов.

Объект и предмет исследования. Объектами исследования являются основные типы грузовых вагонов, эксплуатируемых на железных дорогах, предметами – нагруженность и НДС кузовов вагонов основных типов грузового подвижного состава, определяемые с учетом их силового взаимодействия с перевозимыми грузами.

Положения, выносимые на защиту:

1 Методология разработки конструкций вагонов, отличающаяся методами прочностных расчетов, обеспечивающих комплексный учет силового взаимодействия кузовов с перевозимыми грузами и использование результатов мониторинга технического состояния подвижного состава после длительной эксплуатации, при выборе направлений модификации конструктивных элементов грузовых вагонов.

2 Методы определения напряженно-деформированного состояния кузовов вагонов, отличающиеся комплексным учетом реальных динамических нагрузок, которые возникают вследствие относительного перемещения груза, основанные на компьютерном моделировании силовых взаимодействий в системе «вагон – подвижный груз» («вагон – навалочный груз», «вагон – сыпучий груз», «вагон – наливной груз»).

3 Зависимости, характеризующие реальное силовое нагружение кузовов вагона-платформы для перевозки лесных грузов, полувагона и вагонов бункерного типа при соударении, отличающиеся от нормативной схемы нагружения учетом неравномерности динамического давления груза на торцевую

стену, а также динамической нагруженности пола и боковых стен, и доказывающие, что в кузове вагона для перевозки минеральных удобрений наиболее нагруженной является область перехода от наклонной к вертикальной части торцевой стены, где давление сыпучего груза оказалось превышающим нормативное на 60 %, а максимальные динамические нагрузки на торцевую стену кузова вагона для перевозки леса реализуются при наличии зазора между стеной и грузом, равного 0,070–0,095 м.

4 Зависимости, характеризующие реальное силовое нагружение внутренней поверхности котла вагона-цистерны при перевозке нефтепродуктов, отличающиеся учетом деформаций стенок резервуара при механическом взаимодействии с жидким грузом, и позволившие установить, что наибольшие значения давлений груза на днище котла при соударении вагонов возникают при наливе 70–80 % и превышают на 40 % значения, соответствующие нормативному наливу (97 %).

5 Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния кузовов вагонов, полученные с учетом реальных силовых нагружений при перевозке навалочных, сыпучих и наливных грузов, которые позволили разработать и обосновать комплекс технических решений по созданию новых конструкций.

Личный вклад соискателя. Все основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Совместно с научным консультантом д.т.н. В. И. Сенько осуществлялся выбор направлений исследования и анализ полученных результатов. При участии к.т.н. А. В. Пигунова разработаны конечно-элементные модели кузовов вагонов. Совместно с к.т.н. И. Л. Черниным прорабатывались проектные варианты и технологичность ряда новых конструкций вагонов. Компьютерные модели для анализа перетекания жидкости в транспортном резервуаре разработаны совместно с д.т.н. А. О. Шимановским.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы апробированы на IV Белорусском транспортном конгрессе «Транспорт и логистика» (Минск, 2010); III–V Белорусских конгрессах по теоретической и прикладной механике (Минск, 2007, 2009, 2011); VI Международном симпозиуме по трибофатике МСТФ–2010 (Минск, 2010); международных научно-технических и научно-практических конференциях: «Безопасность движения поездов» (Москва, 2003, 2004); «Проблемы механики железнодорожного транспорта: динамика, прочность и безотказность движения подвижного состава» (Днепропетровск, 2004, 2008); «Lietuva be mocslo – Lietuva be ateities. Transportas» (Вильнюс, 2004); «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (Днепропетровск, 2005, 2011); «Проблемы безопасности на транспорте» (Гомель, 2005, 2007, 2010); «Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций» (Киев, 2005, 2006, 2010); «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» (Красноярск, 2005); «Вычислительная механика деформируемого твердого тела» (Москва, 2006); «Наука, инновации, образование: актуальные проблемы развития

транспортного комплекса России» (Екатеринбург, 2006); «Подвижной состав и безопасность движения на транспорте» (Харьков, 2007, 2009); «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» (Санкт-Петербург, 2007, 2009); «Политранспортные системы» (Красноярск, 2007); «Инновации в машиностроении» (Минск, 2008); «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса» (Гомель, 2008); «Проблемы та перпективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології (Киев, 2011); на международных конференциях: «Методы компьютерного проектирования и расчета нефтяного и газового оборудования» (Тюмень, 2006); «Mokslas – Lietuvos ateitis» (Вильнюс, 2006); «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, 2007); «Modeling of the Mechanics and Mechatronics Systems» MMaMS'2008 (Кошице, 2008); «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов» (Санкт-Петербург, 2009); «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем» (Севастополь, 2011).

Опубликованность результатов диссертации. Основное содержание диссертации опубликовано в 108 научных работах (71,3 а. л.), в том числе 2 монографиях (29,5 а. л.), 30 статьях (12 – за рубежом, 13 – без соавторов) в изданиях, рекомендованных ВАК Республики Беларусь (17,5 а. л.), 48 статьях в научно-технических сборниках и материалах конференций, 19 тезисах докладов на конференциях, 9 патентах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 6 глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Объем диссертации – 371 страница. Работа содержит 191 рисунок, 24 таблицы, 3 приложения на 152 страницах. Библиографический список состоит из 428 наименований, включая 108 публикаций соискателя, и занимает 35 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** «Аналитический обзор литературы. Методология разработки конструкций вагонов» выполнен анализ литературы по теме диссертации, а также определена научная проблема и предложена методология разработки конструкций грузовых вагонов. Отмечено, что основы современных методов исследования отечественного железнодорожного подвижного состава заложили в своих работах известные ученые С. В. Вершинский, В. М. Винокуров, В. А. Лазарян, Е. Н. Никольский, Л. Н. Никольский, И. И. Челноков, Л. А. Шадур и др. Существенный вклад в развитие методов проектирования, расчета и испытаний подвижного состава внесли П. С. Анисимов, А. А. Битюцкий, Е. П. Блохин, Г. И. Богомаз, Ю. П. Бороненко, Э. И. Галай, А. А. Долматов, В. Г. Иноземцев, Б. Г. Кеглин, М. Б. Кельрих, В. В. Кобищанов, В. Н. Котуранов, В. Ф. Лапшин, М. Н. Овечников, Г. И. Петров, В. С. Плот-

кин, Ю. С. Ромен, О. М. Савчук, В. И. Сакало, В. И. Сенько, А. В. Третьяков, А. А. Хохлов, В. Д. Хусидов, Ю. М. Черкашин и многие другие.

Анализ проведенных исследований в рассматриваемой области показал, что при проектировании конкурентоспособных вагонов, а также выполнении работ по совершенствованию конструкций после длительной эксплуатации подвижного состава, например, при проведении капитально-восстановительных работ с продлением срока службы, необходимо рассматривать вагон, как элемент сложной технической системы, взаимодействующий не только с внешними объектами (межвагонные взаимодействия, взаимодействие с рельсовой колеей и прочие), но и с перевозимым грузом, зачастую обладающим существенной подвижностью относительно кузова, что, как следствие, приводит к появлению обратных силовых связей, особенно при экстремальных условиях нагружения (соударении вагонов, экстренном торможении, погрузке кусковыми грузами и прочие). К таким относятся грузы, для которых не предусматривается наличие дополнительных креплений, например навалочные, сыпучие и наливные.

Дополнительно следует отметить, что процесс экстремального нагружения носит кратковременный характер, и в таком случае следует рассматривать комплексную задачу, учитывающую в общем случае взаимовлияние компонентов системы «вагон – подвижный груз», с расширенным описанием свойств последних, таких как реальное техническое состояние металлоконструкции вагона, сжимаемость жидкого груза, когезия сыпучего тела и пр. Отмечено, что существующая нормативная база в ряде случаев не позволяет учитывать или учитывает приближенно нагружение кузовов вагонов такими грузами. В частности, при проектировании кузовов вагонов для перевозки сыпучих и навалочных грузов широкое применение нашла теория Кулона. Однако нормативное приложение давлений от перевозимого сыпучего груза не учитывает физические свойства материала, связанные, например, с когезией, что приводит к существенной корректировке силовых граничных условий, не учитывает особенности динамической нагруженности ряда конструктивных элементов кузовов при соударении вагонов, а также не позволяет определить нагруженность кузовов с поверхностями, имеющими переменный радиус кривизны (например, «каплевидный» профиль). При расчете прочности наливного подвижного состава действующая нормативная база распределение давления жидкого груза по внутренней поверхности котла учитывает весьма приближенно, а влияние частичного заполнения котла жидкостью не учитывает вовсе, что приводит к искажению реального НДС кузовов вагонов-цистерн.

В диссертации предложена методология разработки конструкций вагонов (рисунок 1), основанная на анализе накопленной информации о техническом состоянии металлоконструкции вагонов после длительной эксплуатации, а также учете силового взаимодействия кузовов с перевозимыми грузами при выполнении динамико-прочностных расчетов.

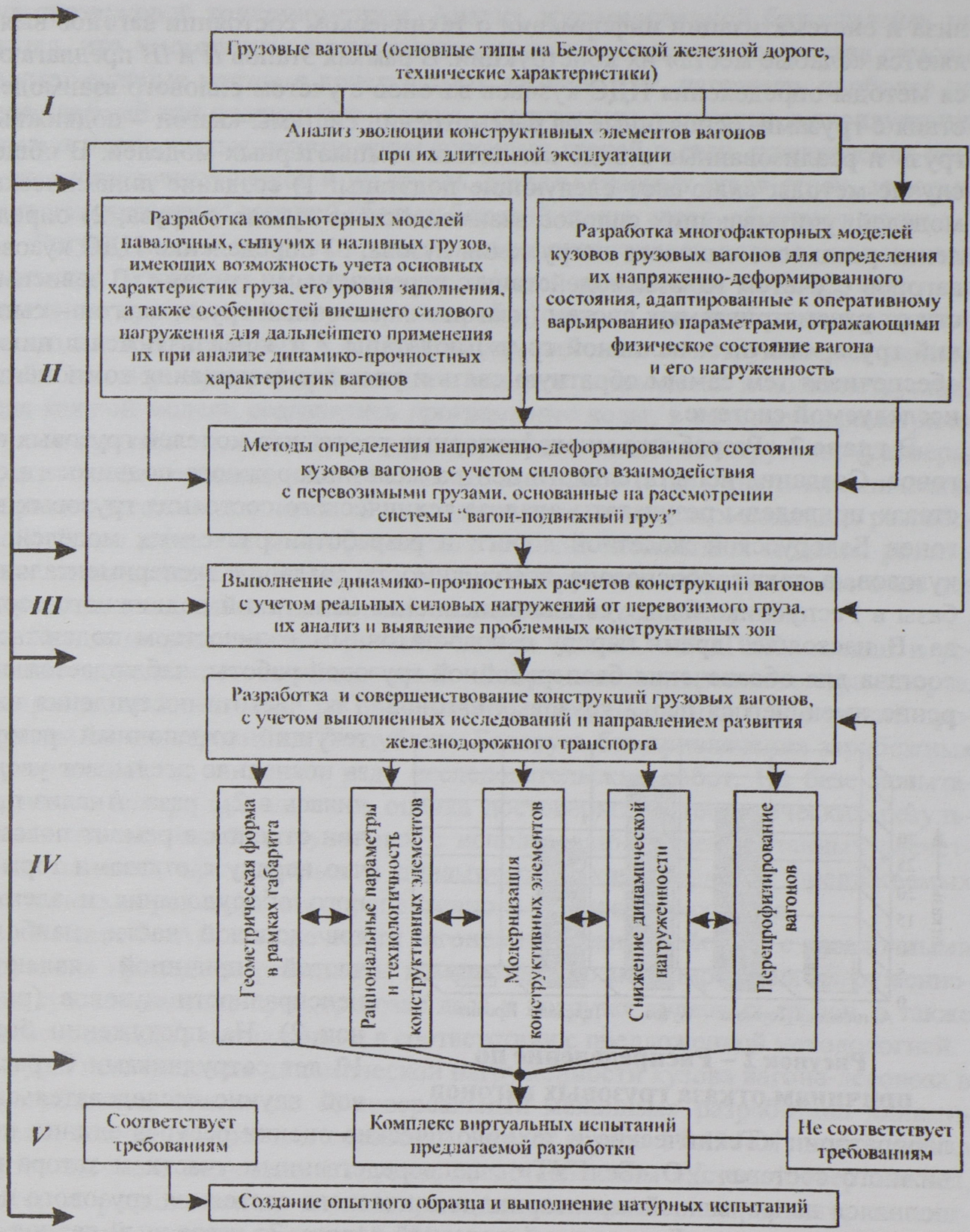


Рисунок 1 – Методология разработки конструкций вагонов

Методология реализуется в несколько этапов (*I–V*) и ключевым отличием от существующего подхода является взаимный учет этапов *I–III*. На первом этапе (информационно-накопительно-аналитическом) на основе сбора, ана-

лиза и систематизации информации о техническом состоянии вагонов выявляются «слабые места» их конструкций. В рамках этапов *II* и *III* предлагаются методы определения НДС кузовов вагонов с учетом силового взаимодействия с грузами, основанные на рассмотрении системы «вагон – подвижный груз» и реализованные в виде комплекса компьютерных моделей. В общем случае методы включают следующие подэтапы: 1) создание динамических моделей, учитывающих силовое взаимодействие кузова и груза; 2) определение реального силового нагружения кузова; 3) определение НДС кузовов вагонов с учетом их взаимодействия с перевозимыми грузами. В зависимости от рассматриваемых систем («вагон – навалочный груз», «вагон – сыпучий груз», «вагон – наливной груз») подэтапы 2 и 3 реализуются в цикле, обеспечивая тем самым обратную связь и учет взаимовлияния компонент в исследуемой системе.

В главе 2 «Разработка многофакторных расчетных моделей грузовых вагонов. Создание испытательного центра железнодорожного подвижного состава» приведены результаты анализа технического состояния грузовых вагонов Белорусской железной дороги и разработки расчетных моделей их кузовов, а также обоснована необходимость создания экспериментальной базы в Республике Беларусь для выполнения испытаний подвижного состава. В настоящее время наряду с недостаточным количеством подвижного состава для обеспечения бесперебойной грузовой работы, наблюдается старение имеющегося парка грузовых вагонов. Так, частота поступления их в текущий отцепочный ремонт за последние десять лет увеличилась в 2,1 раза. Анализ причин отцепок в ремонт показал, что наряду с отказами тормозного оборудования и элементов ходовой части, наиболее частой причиной являются неисправности кузовов (рисунок 2). На протяжении более 10 лет сотрудниками Отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Технические и технологические оценки ресурса единиц подвижного состава» УО «БелГУТ» с непосредственным участием автора выполнялся непрерывный мониторинг технического состояния грузового подвижного состава на Белорусской железной дороге. За указанный период обследовано более 2500 грузовых вагонов. На основе полученного опыта разработаны диагностические карты, которые заполнялись индивидуально по каждому вагону, где помимо записей о наличии трещин, деформаций и прочих визуальных повреждений вагона, фиксировалось реальное физическое состояние кузова, установленное путем проведения в контрольных точках

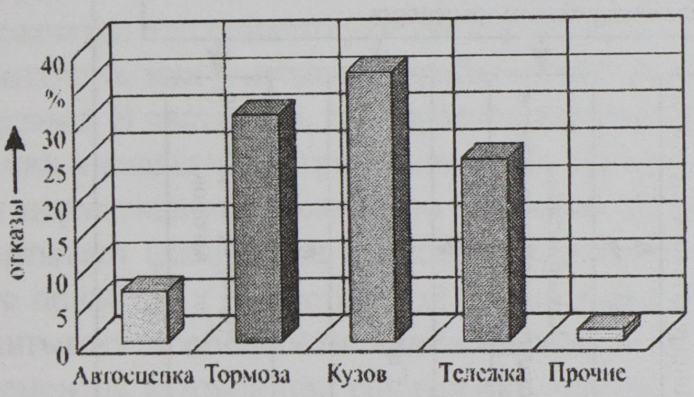


Рисунок 2 – Распределение по причинам отказа грузовых вагонов

ультразвуковой толщинометрии. Анализ сформированной базы данных показал, что многолетняя эксплуатация грузового подвижного состава самовыявляет «слабые места» в конструкциях вагонов. Так, например, наиболее повреждаемый тип подвижного состава – полувагоны, у которых в эксплуатации имеют место частые повреждения торцевых дверей и стен, повреждения крышек разгрузочных люков и их петель, обрывы сварных швов стоек, деформация и повреждения верхней обвязки боковой стены, стоек, обшивы и прочие.

Результаты анализа технического состояния кузовов вагонов использовались при разработке расчетных моделей для определения их НДС. Опыт выполнения проектно-конструкторских работ показал, что необходима разработка моделей, адаптивных к оперативному внесению конструктивных изменений. Поэтому наряду с применением методов подмоделей и подконструкций, для каждой модели создавались программные коды, в которых параметрически задавались как линейные характеристики самой конструкции (размеры, фактические толщины конструктивных элементов и пр.), так и механические характеристики материалов. С использованием описанных подходов разработано более двадцати многофакторных конечно-элементных моделей различных типов эксплуатируемых и вновь проектируемых полувагонов, вагонов для перевозки минеральных удобрений, зерна, цемента, лесных грузов.

При непосредственном участии автора при УО «БелГУТ» создан и успешно развивается испытательный центр железнодорожного транспорта, направленный не только на проведение сертификационных испытаний продукции вагоностроения в Республике Беларусь без привлечения зарубежных организаций, но и целого ряда исследовательских работ. На базе испытательного центра выполнялась оценка достоверности теоретических результатов исследований, получаемых с использованием разработанных расчетных моделей, прочностных и динамических характеристик предлагаемых технических решений для перспективного подвижного состава.

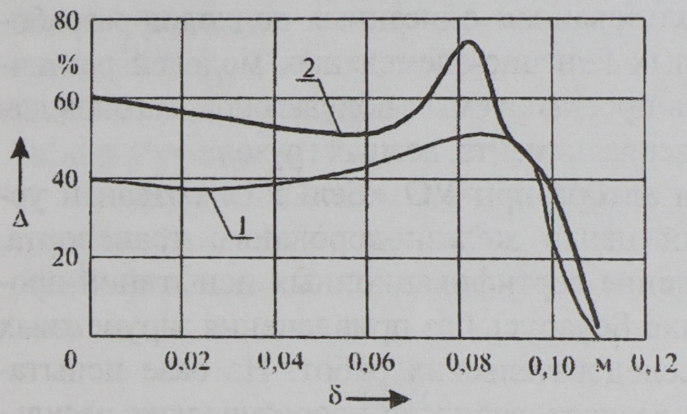
В **главе 3** «Анализ прочности вагонов при взаимодействии с навалочными грузами» приведены результаты компьютерного моделирования нагруженности кузовов вагонов при перевозке леса и погрузке кусковых грузов, а также расчета их НДС, выполненные в соответствии с предложенной методологией.

Для исследования динамической нагруженности кузова вагона-лесовоза в программном комплексе «Универсальный механизм» разработана динамическая модель вагона для перевозки лесных грузов 17-494-01, включающая кузов вагона с подвижным грузом, представленным системой твердых тел, который расположен на тележках, модельные характеристики которых соответствуют тележкам модели 18-100, а также автосцепные устройства, включающие силовые элементы, характеристики которых соответствуют поглощающему аппарату Ш-2-В.

Выполнено компьютерное моделирование режима соударения вагонов, в рамках которого рассмотрено несколько схем: набегание исследуемого вагона с грузом на вагоны подпора и на свободно стоящий вагон; набегание ва-

гона-бойка на свободно стоящий исследуемый вагон с грузом и на исследуемый вагон с грузом, находящийся в подпоре. Максимальные значения скоростей соударения вагонов и сил в автосцепных устройствах принимались не превышающими величин, рекомендованных РД 24.050.37 «Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества». Установлено, что наибольшая динамическая нагруженность кузова исследуемого вагона имеет место при его набегании на вагоны подпора, причем максимальные значения сил взаимодействия бревен с торцевой стеной достигаются в средних слоях бревен. Указанная схема нашла применение при разработке методики испытаний МИ.АЛВЯ.3802.004–2008 «Оценка прочности вагонных конструкций при соударениях» как дополнение к применяемым в настоящее время схемам проведения испытаний.

Выполнен анализ динамической нагруженности торцевой стены при наличии зазора между ней и грузом. На рисунке 3 приведено сравнение найденного по результатам моделирования главного вектора сил, действующих на торцевую стену, со значением, рекомендуемым «Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» (Нормы) при расчете на прочность торцевых стен вагонов, от величины зазора δ. Максимальное значение главного вектора сил, действующих на торцевую стену при скорости соударения 12 км/ч, реализуется при наличии зазора от 0,070 до 0,095 м, что обусловлено наличием в указанном диапазоне перемещений бревен больших значений их относительных скоростей и ускорений. Помимо определения нагруженности торцевой стены вагона получены эпюры распределения сил, действующих на стойки и основания лесных рам, которые для режима соударения не регламентированы Нормами, что позволит в последующем повысить точность прочностных расчетов.



1 – соударение со свободно стоящим вагоном;
2 – соударение с вагоном в подпоре

Рисунок 3 – Отношение главного вектора сил, действующих на торцевую стену, к нормативному значению для разных зазоров

Следует отметить, что разработанная модель имеет возможность оперативной адаптации к любой модификации вагона, а также перевозимого навалочного груза. Это свойство широко использовалось при определении динамической нагруженности вновь проектируемых вагонов. Выполненные исследования НДС кузовов вагонов-платформ для перевозки лесоматериалов моделей 13-9832 и 13-9832-01 показали, что предварительные варианты конструк-

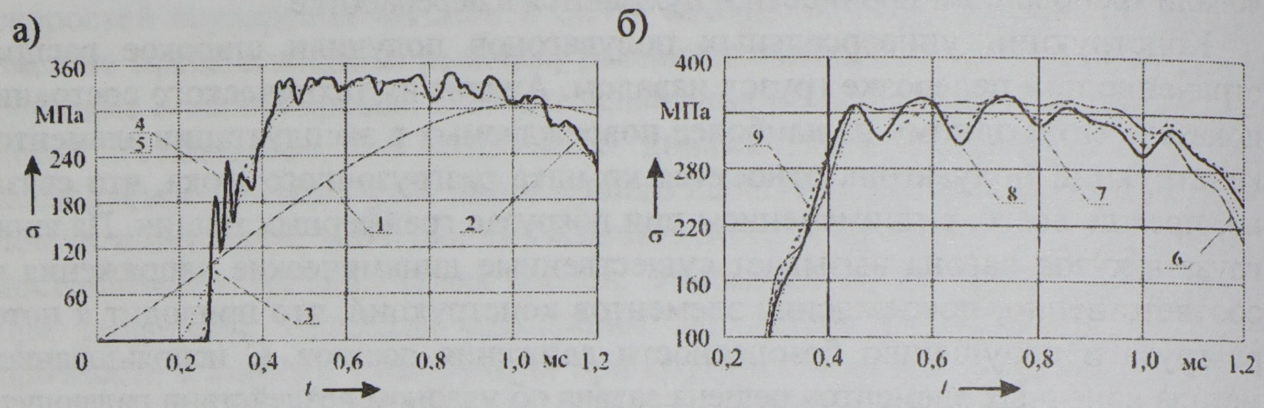
ций, предложенные специалистами конструкторского бюро подвижного состава ОАО «Белорусский автомобильный завод», в ряде случаев не соответствовали требованиям прочности и нуждаются в переработке.

Конструкции универсальных полувагонов получили широкое распространение при перевозке грузов навалом. Анализ их технического состояния показал, что к одному из наиболее повреждаемых в эксплуатации элементов конструкций полувагона относится крышка разгрузочного люка, что связано, прежде всего, с применением при погрузке грейферных машин. Падение груза в кузов вагона вызывает существенные динамические напряжения и, соответственно, повреждения элементов конструкций, что приводит к потере груза и нарушению безопасности движения поездов. С использованием метода конечных элементов решена задача об ударном воздействии падающего груза на крышку разгрузочного люка полувагона. При задании свойств материала крышки люка использована модель с билинейным кинематическим упрочнением, которая описывается четырьмя параметрами: плотностью $\rho = 7850$ кг/м^3, модулем упругости $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, пределом текучести $\sigma_T = 345$ МПа и касательным модулем упругости $E_\tau = 3{,}45 \cdot 10^9$ Па. Для создания регулярной сетки элементов геометрическая модель была представлена в виде набора элементов, разбиение которых гарантирует создание конечных элементов правильной, прямоугольной в плане формы. Для контактирующих частей системы «конструкция – груз» задавались коэффициенты трения покоя, динамического и вязкого трения.

С целью получения достоверных результатов и установления сходимости итерационного процесса выполнена серия расчетов для случая центрального поперечного удара падающим телом массой 5 кг с высоты 1 м при изменении шага по времени Δt и размера конечных элементов b в зоне контакта. Из зависимостей эквивалентных напряжений в точке центрального соударения с размером конечного элемента в плане 10^{-2} м (рисунок 4, *а*) видно, что по мере уменьшения временно́го шага выявляется время ударного взаимодействия, которое составляет около 10^{-3} с. Установлено, что при шаге по времени менее $5 \cdot 10^{-5}$ с результаты вычисления напряжений остаются практически неизменными. Поэтому дальнейшие исследования выполнялись при размере стороны конечного элемента в области контактного взаимодействия 5 мм и временно́м шаге $5 \cdot 10^{-5}$ с.

Выполнено исследование НДС типовой конструкции крышки люка при падении груза массой 150 кг с высоты 3 м (требование к вновь проектируемым конструкциям). Падающий груз представлен сферой с механическими характеристиками, соответствующими бетону. На рисунке 5 показано распределение напряжений в крышке люка спустя 0,0102 с после начала взаимодействия с кусковым грузом, падающим в ее геометрический центр. Для анализа различных случаев падения груза на закрытую крышку люка плоскость крышки условно разделена на шесть равных по площади зон, в середине каждой из которых назначалось место падения груза (осуществлялась допол-

нительная подготовка конечно-элементной сетки для корректного решения контактной задачи). Анализ прочности выполнен по 59 контрольным точкам.



1 – $\Delta t = 10^{-3}$ с; 2 – $\Delta t = 10^{-4}$ с; 3 – $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$ с; 4 – $\Delta t = 10^{-5}$ с; 5 – $\Delta t = 10^{-6}$ с;
6 – b = 0,02 м; 7 = b = 0,01 м; 8 – b = 0,005 м; 9 – b = 0,00125 м

Рисунок 4 –Зависимости эквивалентных напряжений в зоне взаимодействия для различных шагов по времени и размеров элементов

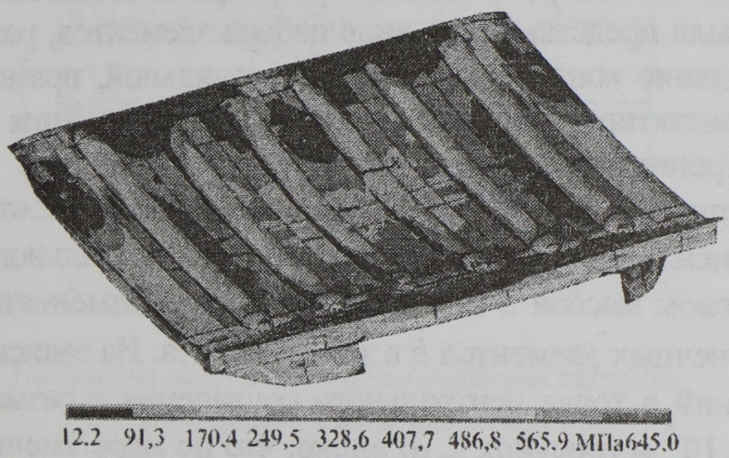


Рисунок 5 – НДС крышки люка при падении кускового груза

Установлено, что в большинстве конструктивных элементов крышки люка в течении короткого промежутка времени наблюдаются значения напряжений, превышающие предел текучести материала. Кроме того, выполнены расчеты прочности крышки люка при действии нормативных квазистатических нагрузок, которые также показали, что в ряде случаев конструкция не соответствует современным требованиям.

В **главе 4** «Анализ нагруженности и прочности вагонов при перевозке сыпучих грузов» рассмотрена эволюция нормативного нагружения кузовов вагонов сыпучими грузами при расчетах на прочность вагонов, а в рамках реализации предложенной методологии выполнено компьютерное моделирование нагруженности кузовов вагонов сыпучими грузами и проведены исследования их НДС. Приведен анализ вывода нормативной зависимости, определяющей нагруженность стен вагона от перевозимого сыпучего груза, который позволил выявить имеющуюся в ней неточность. Разработаны математические модели, основанные на представлении сыпучего груза в виде системы твердых тел и континуальной среды, контактирующей с металлоконструкцией, которые позволяют, в отличие от нормативных схем прило-

жения силовых факторов, учитывать особенности физико-механических характеристик перевозимого груза, формы кузова и динамики переходного режима движения.

Для решения задачи о динамической нагруженности кузова полувагона на первом этапе применен подход, связанный с представлением сыпучей среды системой твердых тел (гранул). Поставленная задача реализована с использованием программного комплекса «Универсальный механизм». Все гранулы представлены плоскими многоугольниками и имеют по три степени свободы. Для каждой гранулы в общем случае динамические уравнения движения имеют вид

$$m_i \bar{a}_i = \bar{F}_i; \; I_{zi}\bar{\varepsilon}_i = \bar{M}_{zi}\left(\bar{F}_i^{\tau}\right),$$

где m_i – масса i-й гранулы; $\bar{a}_i$ – вектор ускорения центра масс i-й гранулы; $\bar{F}_i$ – главный вектор сил, действующих на i-ю гранулу; I_{zi} – момент инерции относительно оси z, проходящей через центр масс i-й гранулы; ε_i – угловое ускорение относительно той же оси i-й гранулы; $M_{zi}\left(\bar{F}_i^{\tau}\right)$ – момент главного вектора касательных составляющих сил.

Главный вектор сил, действующих на i-ю гранулу, представляет собой векторную сумму сил трения и нормальных сил взаимодействия i-й гранулы с соседними частицами, нормальных и касательных сил в случае взаимодействия с кузовом вагона и силы тяжести i-й гранулы. Момент главного вектора касательных составляющих сил состоит из моментов сил трения взаимодействия i-й гранулы с соседними частицами и с кузовом.

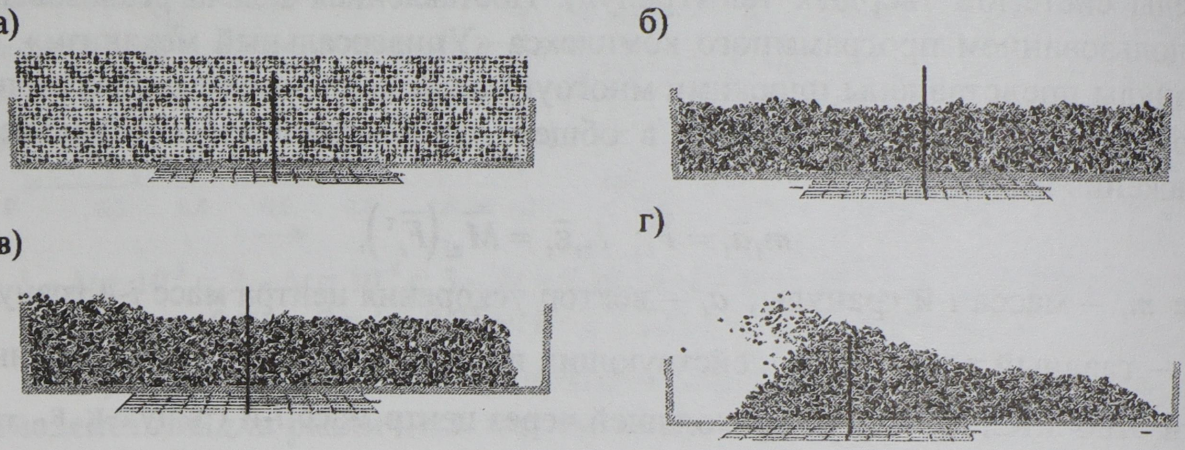
Нормальная составляющая сил взаимодействия представлена линейной вязкоупругой моделью $N = -c_k\Delta - \mu\dot{\Delta}$ с постоянными коэффициентами контактной жесткости c_k и диссипации μ. Здесь Δ и $\dot{\Delta}$ – глубина и скорость внедрения. Модель силы трения предполагает два режима: скольжение и сцепление. В режиме скольжения сила трения направлена против скорости скольжения точки второго тела по плоскости и составляет

$$\bar{F}_{\text{тр}} = -fN(e_s^T \nu_{c12})\bar{e}_s,$$

где f – коэффициент трения скольжения; e_s – орт, направленный по контактной прямой; ν_{c12} – вектор относительной скорости точки второго тела.

С использованием описанного подхода решена задача по определению нагруженности кузова полувагона при перевозке щебня. Груз представлен в виде 2000 гранул с плотностью 2500 кг/м^3. При моделировании приняты пятиугольные гранулы со следующим соотношением: 50 % с размером 70 мм, 25 % с размером 50 мм и 25 % с размером 40 мм. Моделирование выполнено в два этапа. На первом этапе задано время для обеспечения усадки груза в ку-

зове, затем рассматривается режим соударения вагонов (рисунок 6). Полученное значение результирующей продольной силы, действующей на торцевую стену, оказалось близким к нагрузке, рекомендуемой Нормами, но этот подход оказался весьма трудоемким при рассмотрении мелкодисперсных грузов, особенно в трехмерной объемной постановке.



а – t = 0; б – t = 5 с; в – t = 5,22 с; г – t = 5,65 с

Рисунок 6 – Динамика сыпучего груза при соударении вагонов

В связи с этим на втором этапе рассмотрено моделирование сыпучего груза континуальной средой с использованием теории пластического течения Друккера-Прагера. Переход среды в пластическое состояние происходит в результате превышения предельного значения максимальных касательных напряжений, при этом уравнение поверхности текучести имеет вид

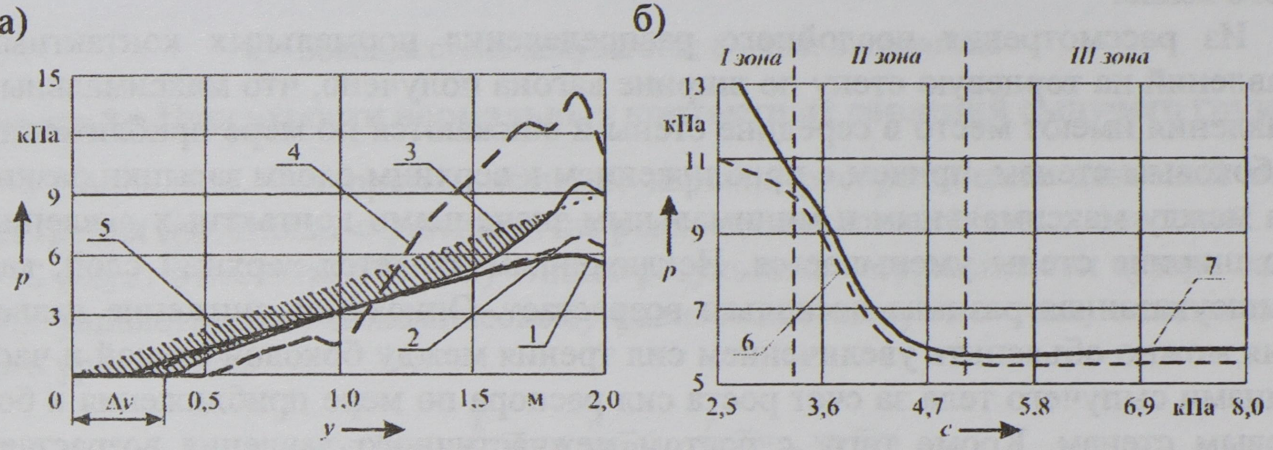
$$\frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)} I_1 + \sqrt{J_2} - \frac{6c\cos\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)} = 0,$$

где φ – угол внутреннего трения сыпучего груза; I_1 – первый инвариант тензора напряжений; J_2 – второй инвариант девиатора тензора напряжений; c – удельное сцепление (когезия).

С использованием такого подхода методом конечных элементов проведены исследования статической и динамической нагруженности кузова 4-осного универсального полувагона. Приняты следующие характеристики сыпучего груза: плотность γ = 1300 кг/м^3; угол естественного откоса $\varphi = 30^\circ$; модуль упругости $E = 10^6$ Н/м^2; коэффициент Пуассона μ = 0,27; значение когезии c = 7200 Н/м^2; угол дилатансии – 0°. С целью учета сцепления сыпучего груза со стенами кузова решалась контактная задача при коэффициенте трения на границе раздела «сыпучий груз – металл», равным 0,3.

Полученные максимальные значения статических давлений на пол вагона хорошо согласуются с классической теорией предельного равновесия сыпучего тела и экспериментальными данными. В то же время статическое давление на торцевую стену оказалось меньшим на 35 %, чем получаемое по

формуле, приведенной в Нормах. Учитывая, что в нормативном выражении отсутствует параметр оценки связанности сыпучей среды, проведена серия расчетов при варьировании значений когезии. Результаты расчетов показали (рисунок 7), что при снижении уровня сцепляемости сыпучей среды значения контактных давлений на торцевую стену существенно возрастают. В то же время практически не изменяется давление, оказываемое на пол вагона. Давление же на стену вагона при малых значениях сцепляемости сыпучей среды (линия 3) принципиально согласуется с теорией Кулона (линия 5). Некоторое расхождение результатов обусловлено появлением «поля уплотнения» (заштрихованная область), определяемого величиной деформации сыпучего тела Δ_y, которая по мере снижения уровня когезии увеличивается.



1 – c = 7,2 кПа; 2 – c = 4,2 кПа; 3 – c = 3,0 кПа; 4 – c = 2,5 кПа; 5 – по нормативной формуле; 6 – давление на максимальной глубине засыпки; 7 – максимальное давление

Рисунок 7 – Зависимости давления сыпучего груза на торцевую стену от высоты засыпки (а) и величины когезии (б)

Исходя из зависимостей рисунка 7, *б*, при определении распределения давления на стены вагона можно условно выделить три зоны состояния сыпучего тела в зависимости от уровня сцепления между его частицами. Установлено, что при значении когезии $c < 3000$ Н/м^2 (зона I) максимальные давления на торцевую стену возрастают до величины, соответствующей гидростатическому давлению, что обусловлено преобладанием свойств жидкости, при которых касательные напряжения между частицами среды стремятся к нулю. II зону при $3000 < c < 5000$ Н/м^2 следует считать переходной, где сыпучая среда частично обладает свойствами жидкости, но с наличием связанности между частицами. При рассмотрении III зоны ($c > 5000$ Н/м^2) высокая связанность между частицами ведет к стабилизации максимального уровня давления на торцевую стену вагона.

Анализ результатов исследований для ударного нагружения показал, что распределение нормальных контактных давлений по торцевой стене не носит равномерного характера, рекомендуемого Нормами при расчете на

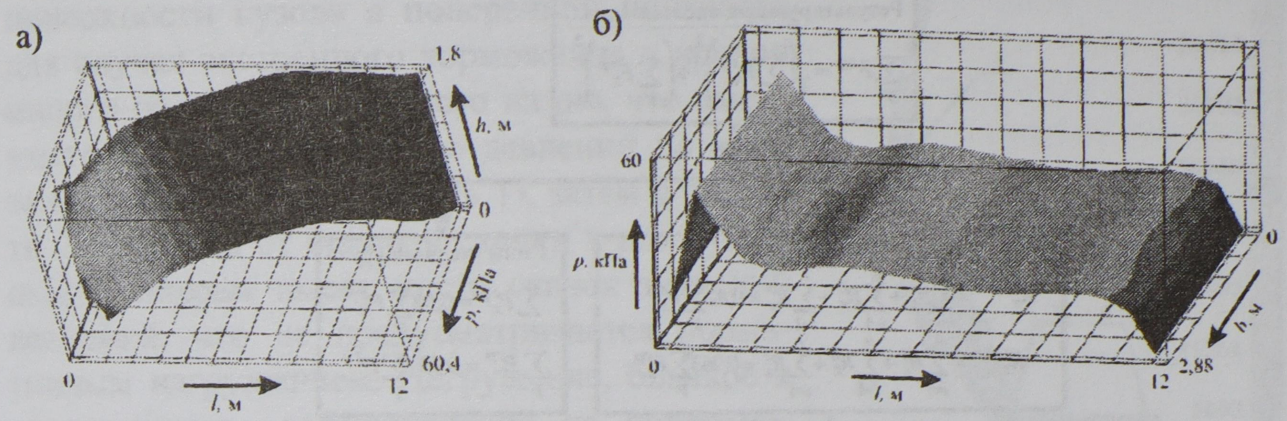
прочность вагонов. В то же время значение максимального давления, полученное с помощью разработанной модели, оказалось несколько меньшим значения удельного давления, рассчитанного по рекомендации действующих норм применительно к геометрическим параметрам виртуальной модели. Установлено, что максимальное давление реализуется на высоте составляющей 0,33 от уровня засыпки $h_з$, причем от пола до высоты $0,12h_з$ наблюдается высокий градиент роста контактного давления, и далее оно плавно возрастает до указанного выше максимального значения. В интервале высот от $0,12h_з$ до $0,89h_з$ изменение контактного давления интерполируется пологой параболой. Затем наблюдается практически линейный рост величины нормальных контактных давлений до значения, равного 97 % от максимального, указанного выше.

Из рассмотрения послойного распределения нормальных контактных давлений на торцевую стену по ширине вагона получено, что максимальные давления имеют место в середине стены и снижаются по мере приближения к боковым стенам, причем с приближением к верхним слоям засыпки разница между максимальным и минимальным значениями контактных давлений по ширине стены уменьшается. Исключением является верхний слой, где вышеуказанная разница несколько возрастает. Описанное снижение давления можно объяснить увеличением сил трения между боковой стеной и частицами сыпучего тела за счет роста сил распора по мере приближения к боковым стенам. Кроме того, с ростом межчастичного давления возрастает роль когезионной составляющей. Эффект «давления верхнего слоя» объясняется снижением вертикальной составляющей давления сыпучего груза по мере приближения к верхнему слою засыпки и снижением, как следствие, сил распора, что подтверждается анализом кинематических параметров слоев сыпучего тела.

Исследования показали, что нормальные контактные давления на боковую стену по мере приближения к нагруженной торцевой стене нелинейно возрастают (рисунок 8, *а*) и для рассматриваемого полувагона достоверно аппроксимируются полиномом пятой степени $p(l) = -0,0036l^5 + 0,1163l^4 - 1,426l^3 + 8,61l^2 - 29,8l + 62,2$. Из рассмотрения характера изменения контактных давлений от пола до свободной поверхности сыпучего тела видно, что их незначительное уменьшение обусловлено снижением сил распора.

Полученное распределение нормальных контактных давлений по полу вагона представлено на рисунке 8, *б*. Максимальное значение давления имеет место на расстоянии, равном $0,018l$, далее по мере удаления от торцевой стены наблюдается близкое к линейному снижение давлений в 3 раза, а затем с пологим экстремумом имеет место незначительное снижение давлений. Далее на интервале от $0,95l$ до l наблюдается снижение давлений практически до нуля. При рассмотрении распределения нормальных давлений по полу вагона в поперечной плоскости наблюдается незначительное возрастание значений дав-

лений от средней части к боковым стенам, причем с удалением от боковой стены оно практически сглаживается.



а – боковая стена полувагона; б – пол полувагона

Рисунок 8 – Поверхности нормальных контактных давлений сыпучего груза

Установлено, что принципиальная картина распределения давлений от сил трения (касательных) аналогична распределению контактных давлений.

Следует отметить, что полученные результаты нагруженности кузова вагона удовлетворяют динамическому равновесию сыпучего тела, описываемого уравнением

$$\sum_{V} \bar{F}^{гр} + \sum_{i=1}^{k} \bar{R}_i^{т} + \sum_{i=1}^{n} \bar{R}_i^{б} + \sum_{i=1}^{r} \bar{R}_i^{п} = \sum_{V} \bar{P}^{гр},$$

где $\sum_{V} \bar{F}^{гр}$ – результирующая внешних сил, действующих на объем V сыпучего груза; $\sum_{i=1}^{k} \bar{R}_i^{т}$ – результирующая реакция торцевой стены; $\sum_{i=1}^{n} \bar{R}_i^{б}$ – результирующая реакция боковой стены; $\sum_{i=1}^{r} \bar{R}_i^{п}$ – результирующая реакция пола вагона; $\sum_{V} \bar{P}^{гр}$ – результирующая сила инерции объема V сыпучего тела; k, n, r – число узлов на торцевой стене, боковой стене и полу вагона, соответственно.

На рисунке 9 изображена схема распределения действующего на загруженный кузов вагона силового поля, разделенного на вертикальную и горизонтальную составляющие.

Описанная выше модель деформирования сыпучей среды использована при исследовании динамической нагруженности кузова вагона бункерного типа для перевозки минеральных удобрений модели 19-9774. Рассмотрены режимы ударного нагружения, а также экстренное торможение в кривой малого радиуса, как наиболее опасные с позиции нагруженности кузова вагона. На рисунке 10, *а* приведена эпюра распределения контактных давлений на

нагруженную торцевую стену и поверхности разгрузочных бункеров вагона в средней продольной плоскости при ударном нагружении.

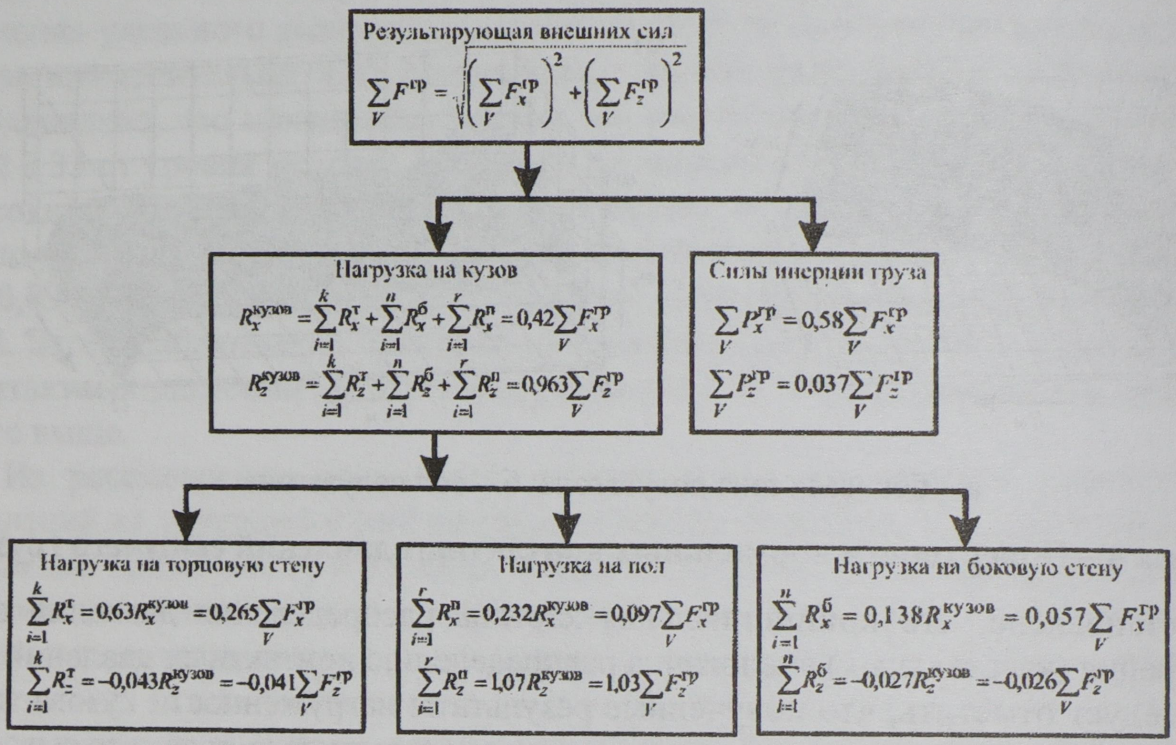


Рисунок 9 – Схема распределения действующего силового поля

Установлено, что наиболее нагруженной при соударении вагонов является область перехода от наклонной к вертикальной зоне торцевой стены, где давление сыпучего груза оказалось превышающим нормативное на 60 %, а также верхняя часть среднего бункера, где распределение давления при ударном нагружении нормативом не регламентировано. Интенсивность изменения контактных давлений во времени для различных областей конструкции можно проследить по зависимостям, приведенным на рисунке 10, *б* (линии 1–4 соответствуют областям, отмеченным на рисунке 10, *а*). Как видно из представленных графиков, значения максимальных давлений достигаются через 0,27–0,28 с после начала процесса ударного нагружения.

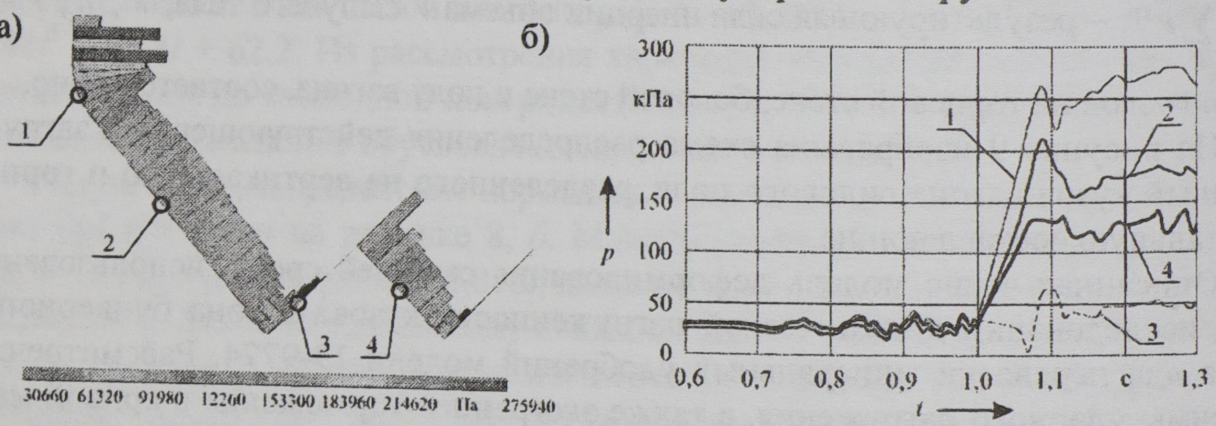


Рисунок 10 – Эпюра распределения контактных давлений (Па) и временные зависимости изменения давлений в характерных областях

На рисунке 11 приведена эпюра распределения контактных давлений по внутренней поверхности кузова в поперечной плоскости для случая экстренного торможения в кривой малого радиуса, из которого видно, что имеет место плавное увеличение давлений по мере заполнения грузом (область 1), затем в области 2 перехода от боковой стенки к разгрузочным бункерам имеет место скачок значений давлений, что не предусматривается нормативным нагружением. Нагружение, близкое к равномерному, зафиксировано на поверхностях бункера (области 3 и 4).

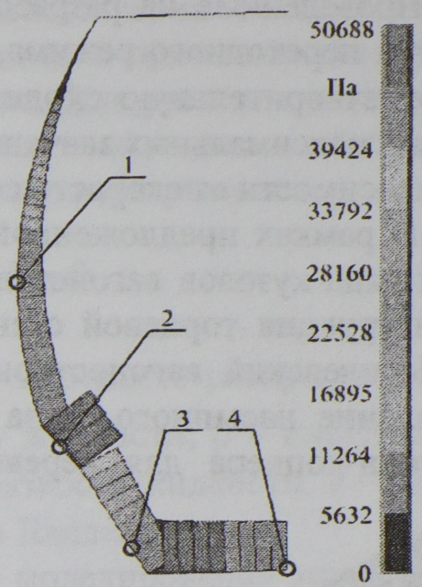
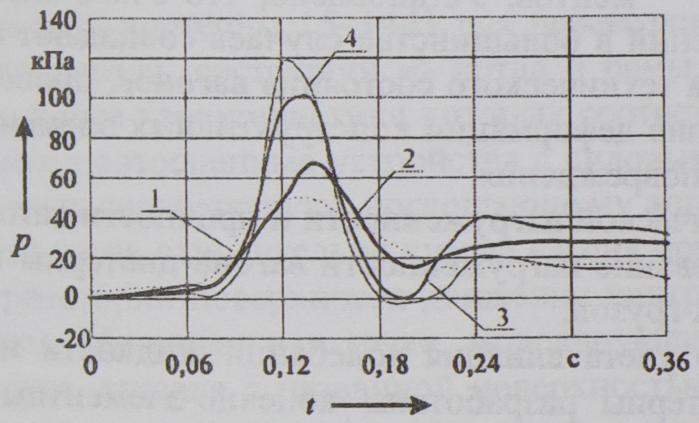


Рисунок 11 – Распределение контактных давлений в поперечной плоскости

На испытательном центре УО «БелГУТ» проведены натурные экспериментальные исследования нагруженности торцевой стены 4-осного полувагона, загруженного кварцевым песком, при соударении с различными скоростями. С этой целью спроектировано и изготовлено устройство, обеспечивающее регистрацию распределения давлений от сыпучего груза на кузов вагона с использованием метода электротензометрии. Для максимального учета воздействия сыпучего груза на кузов вагона при соударении, в отличие от нормативной схемы испытаний, экспериментальный вагон выступал вагоном-бойком, набегающим на вагоны подпора. Выполнена серия соударений с поинтервальным увеличением скорости. На рисунке 12 приведены временные зависимости динамического давления песка на торцевую стену в контролируемых точках 1–4, а также эпюра распределения максимальных значений давлений.



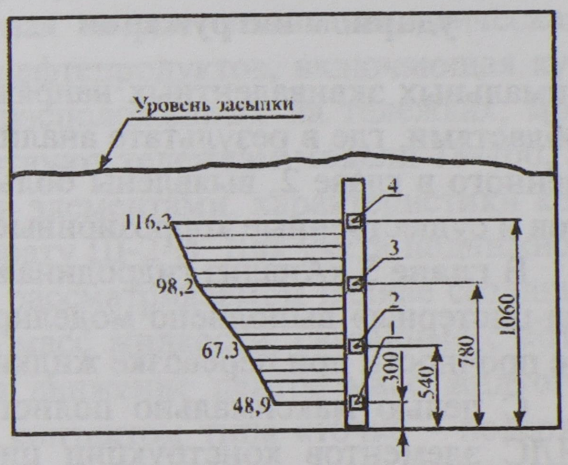


Рисунок 12 – Временные зависимости и эпюра максимальных значений динамического давления песка на торцевую стену (скорость соударения 9 км/ч)

Проведенные на разработанных моделях расчеты с аналогичными условиями переходного режима, свойствами груза и заполнения вагона показали удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными. Расхождение максимальных значений динамических давлений составило от 6 до 23 % в зависимости от скорости соударения и уровня наполнения кузова песком.

В рамках предложенной методологии проведены исследования прочности ряда кузовов вагонов для перевозки сыпучих грузов. Установлено, что конструкция торцевой стены полувагона модели 12–783 постройки СЗАО «Могилевский вагоностроительный завод» не выдерживает динамическое давление насыпного груза при ударном нагружении. Анализ НДС кузова вагона-хоппера для перевозки минеральных удобрений модели 19-9774, спроектированного конструкторским бюро подвижного состава ОАО «БелАЗ», при ударном нагружении показал, что превышение допускаемого уровня напряжений фиксируется практически по всей конструкции торцевой стены, а также в примыкающих к ней элементах (рисунок 13). По остальным конструктивным группам расчетные эквивалентные напряжения не превысили допускаемых. Дополнительно для получения информации по выбору путей совершенствования конструкций грузового подвижного состава проведены исследования НДС кузовов вагонов, находящихся в эксплуатации, с учетом утонения конструктивных элементов. Установлено, что очаги максимальных эквивалентных напряжений в большинстве случаев совпадают с областями, где в результате анализа технического состояния вагонов, проведенного в главе 2, выявлены большие деформации конструктивных элементов и существенные коррозионные повреждения.

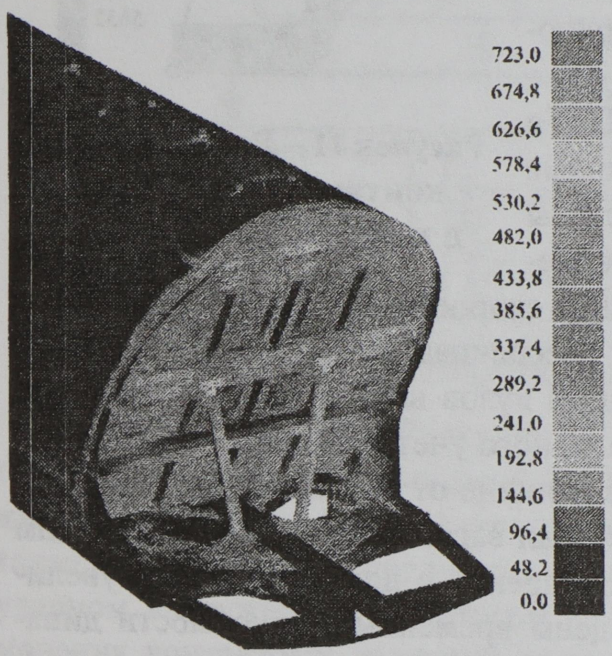


Рисунок 13 – НДС исходной конструкции при ударном нагружении

В **главе 5** «Анализ гидродинамической нагруженности и прочности вагона-цистерны» выполнено моделирование нагруженности вагона-цистерны и ее прочности при перевозке жидких грузов.

С целью максимально полного учета влияния колебаний жидкости на НДС элементов конструкции цистерны разработаны конечно-элементные модели, формируемые с использованием алгоритма, предусматривающего выполнение серии расчетов при варьировании степенью дискретизации, уровнем налива, родом груза, характером течения, шагом итерационного

процесса, а также внешним воздействием. Выполненная серия тестовых расчетов позволила построить модели, наиболее адекватно описывающие рассматриваемый переходный режим движения вагона. Для решения задачи о гидродинамической нагруженности котла цистерны использована система уравнений движения вязкой жидкости Навье-Стокса и неразрывности:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{f} - \frac{1}{\rho}\operatorname{grad} p + \nu\,\Delta\bar{v}\,;\ \operatorname{div}\bar{v} = 0\,,$$

где $\bar{v}$ – вектор скорости частицы жидкости; $\bar{f}$ – плотность распределения внешних объемных сил, действующих на частицу жидкости; ρ – плотность жидкой среды; p – давление; ν – кинематическая вязкость жидкости, $\nu = \mu/\rho$; μ – динамическая вязкость жидкости; Δ – оператор Лапласа.

В диссертации предложен метод двухэтапного моделирования динамики наливного подвижного состава, позволяющий определять особенности движения и действующие силы на вагон-цистерну. На первом этапе анализ перетекания жидкости в котле железнодорожной цистерны использован для определения траекторий перемещения центра масс груза и сил сопротивления его перетеканию. Принято, что равнодействующая сил сопротивления прямо пропорциональна относительной скорости центра масс жидкости $\underline{v}^{\text{отн}} = \left(v_x^{\text{отн}} \;\; v_y^{\text{отн}} \;\; v_z^{\text{отн}}\right)^{\text{т}}$, где $v_x^{\text{отн}}$, $v_y^{\text{отн}}$, $v_z^{\text{отн}}$ – проекции вектора скорости на оси декартовой системы координат. Коэффициентом пропорциональности выступает коэффициент удельного сопротивления $\underline{\alpha} = 2m_{\text{ж}}\underline{n} = \left(2m_{\text{ж}}n_x \;\; 2m_{\text{ж}}n_y \;\; 2m_{\text{ж}}n_z\right)^{\text{т}}$, где $m_{\text{ж}}$ – масса жидкости; $\underline{n}$ – матрица координатных составляющих коэффициентов затухания. Нижнее подчеркивание здесь обозначает матрицу.

Затем для анализа динамики железнодорожной цистерны при различных режимах эксплуатации (этап второй) в программном комплексе «Универсальный механизм» разработана трехмерная твердотельная динамическая модель цистерны 15–1443 для перевозки нефтепродуктов, включающая кузов вагона, состоящий из котла и рамы, расположенных на тележках, модельные характеристики которых соответствуют тележкам модели 18-100, а также автосцепные устройства с силовыми элементами, характеристики которых соответствуют поглощающему аппарату Ш-2-В. Для учета подвижности груза относительно кузова вагона при рассматриваемом наливе созданы траектории-поверхности движения центра масс жидкости, связанные с котлом. Материальная точка, моделирующая движение центра масс жидкого груза, связана с названной поверхностью контактом типа «точка – поверхность» и имеет возможность перемещения по ней. Учтена также функция изменения составляющих силы сопротивления перетеканию жидкости, определенных на первом этапе. Таким образом, полученная модель дает воз-

можность уточненного определения параметров движения наливного подвижного состава, а следовательно, и особенностей внешнего силового нагружения вагонов-цистерн.

В рамках предложенной методологии реализован метод определения НДС деформируемого кузова вагона-цистерны при его силовом взаимодействии с жидкостью. Процесс расчета разбивался на интервалы, число которых зависит от шага по времени, принимаемого исходя из размеров конечных элементов и средней скорости движения жидкости при переходном режиме. На каждом шаге по времени выполнялся расчет НДС конструкции под действием внешних сил и давления жидкости на его внутреннюю поверхность. Одновременно перемещения узлов поверхности взаимодействия $\{u\}$ используются для решения задачи гидродинамики. Расчеты с обменом информацией повторяются в течение рассматриваемого времени (рисунок 14). Таким образом, на протяжении всего переходного режима движения выполнялся прочностной мониторинг металлоконструкции вагона с учетом взаимодействия с перевозимым жидким грузом.

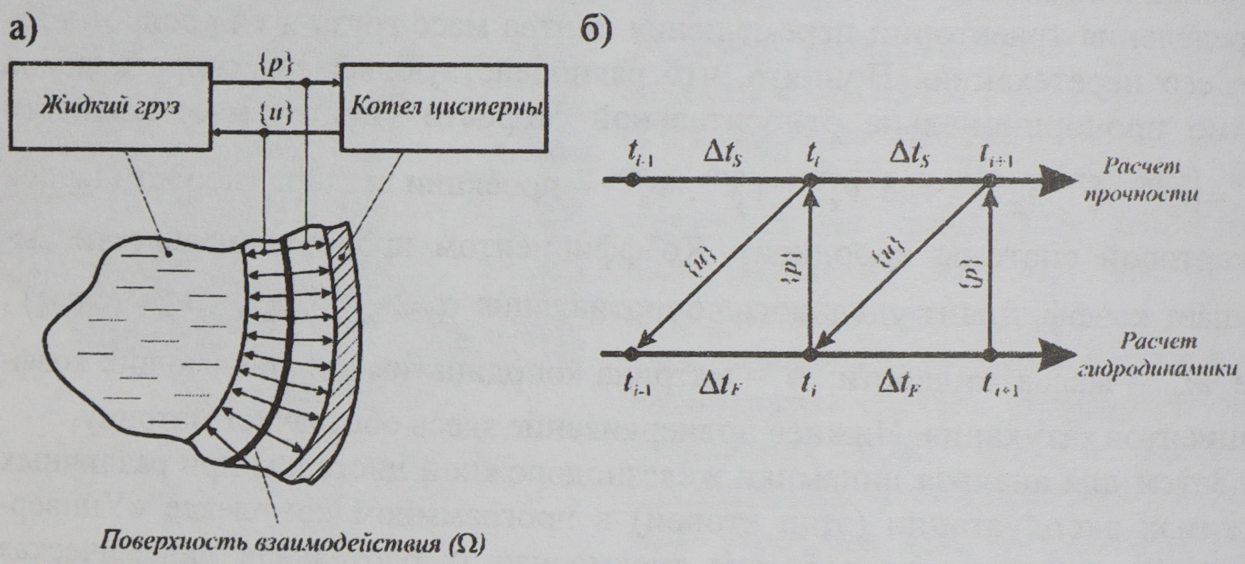


Рисунок 14 – Схемы взаимодействия жидкого груза с металлоконструкцией котла цистерны (а) и итерационного процесса (б)

Математическую реализацию описанного процесса для задачи взаимодействия системы «податливая конструкция – жидкость» можно представить в матричной форме связанных дифференциальных уравнений:

$$\begin{bmatrix} [M_S] & [0] \\ [M_{FS}] & [M_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_S] & [0] \\ [0] & [C_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_S] & [K_{FS}] \\ [0] & [K_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{p\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_S(t)\} \\ \{F_F(t)\} \end{Bmatrix},$$

где $[M_S]$, $[M_F]$ – матрицы масс котла цистерны и жидкого тела; $[C_S]$, $[C_F]$ – матрицы коэффициентов сопротивлений для металлоконструкции котла (при их наличии и учете) и жидкого тела (при их наличии и учете); $[K_S]$, $[K_F]$ – матрицы жесткости для металлоконструкции котла и жидкости; $[M_{FS}]$, $[K_{FS}]$ –

матрицы масс и жесткости поверхности взаимодействия «жидкость – конструкция»; $\{u\}$ – матрица узловых перемещений конструкции котла; $\{p\}$ – матрица давлений жидкого тела; $\{F_S(t)\}$, $\{F_F(t)\}$ – матрицы приложенных узловых сил к металлоконструкции котла и к жидкому телу.

Матрицы $[M_{FS}]$ и $[K_{FS}]$ обеспечивают взаимодействие двух сред. Так, при рассмотрении несжимаемой жидкости можно записать:

$$[M_{FS}] = \rho[R]^{\mathrm{T}}; \; [K_{FS}] = -[R],$$

где ρ – плотность жидкости,

$$[R]^{\mathrm{T}} = \int\limits_{(\Omega)} \{N_S\}\{N_F\}^{\mathrm{T}}\{n\}d(\Omega),$$

$\{N_S\}$, $\{N_F\}$ – матрицы функций формы для дискретизации областей металлоконструкции котла и жидкого тела; $\{n\}$ – матрица нормальных векторов к поверхности раздела (взаимодействия) двух сред; Ω – смоченная поверхность (поверхность взаимодействия).

Выполнены исследования НДС цистерны модели 15-1443 при ударном нагружении. На рисунке 15 приведено распределение эквивалентных напряжений в металлоконструкции котла, заполненного водой, и положение груза при наливе 97 %, соответствующие моменту времени 0,3 с после начала переходного режима.

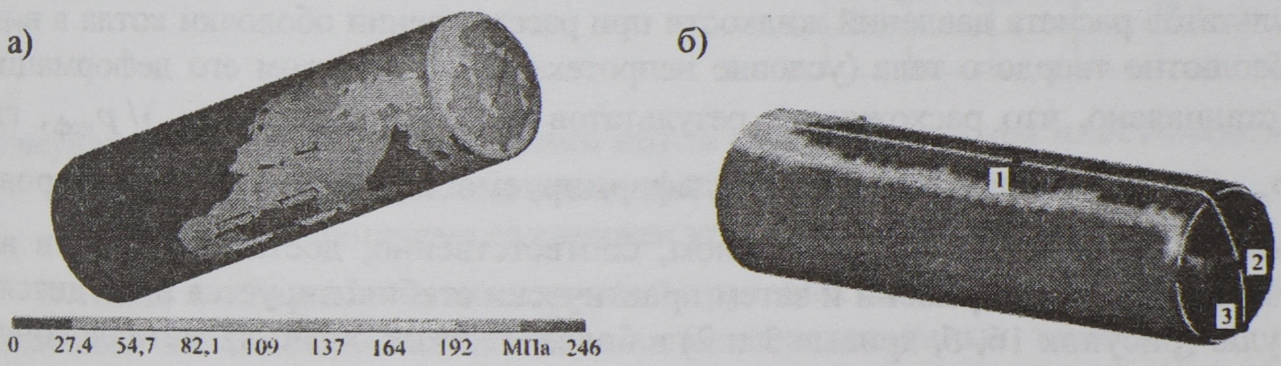
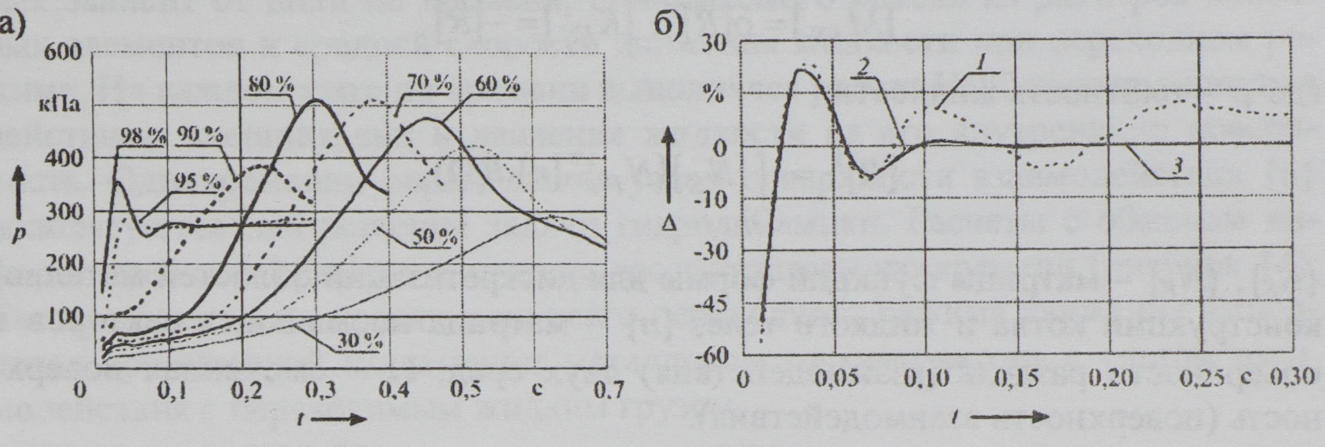


Рисунок 15 – Эквивалентные напряжения в металлоконструкции котла и соответствующее положение жидкого тела после соударения

На рисунке 16, *а* приведены временны́е зависимости гидродинамической нагруженности области 3 (см. рисунок 15, *б*), соответствующие различным уровням заполнения жидким грузом. Характерно, что максимальные давления жидкости при различных наливах котла реализуются в разные моменты времени, и чем меньше налив котла, тем больший временной интервал следует рассматривать, а экстремум временно́й зависимости становится менее выраженным. Установлено, что при наливе 70–80 % наблюдаются наибольшие давления жидкости на днище и на 40 % превышающие значения, соответствующие нормативному наливу (97 %). При увеличении вязкости перевозимого

груза до 0,4 кг/(м·с) максимальные давления также соответствуют 70–80 % налива, но наблюдается снижение указанного превышения их значений относительно случая нормативного заполнения котла жидким грузом. Характерно, что наибольшие значения деформаций, например вертикального смещения в наиболее нагруженной области среднего соединения котла с рамой, зафиксировано также при значительном недоливе котла.



а – временные зависимости гидродинамической нагруженности днища котла;
б – изменение результатов гидродинамической нагруженности котла относительно случая пренебрежения его деформации

Рисунок 16 – Результаты расчетов

На рисунке 16, *б* приведены зависимости, демонстрирующие разность результатов расчета давлений жидкости при рассмотрении оболочки котла в виде абсолютно твердого тела (условие непротекания) и с учетом его деформаций. Установлено, что расхождение результатов Δ ($\Delta = 100(p_{\text{деф}} - p_{\text{атт}})/p_{\text{деф}}$, где $p_{\text{деф}}$, $p_{\text{атт}}$ – давление при учете деформируемости котла и при моделировании его абсолютно твердым телом, соответственно, достигает 50 % в начальный момент времени и затем практически стабилизируется и сводится к нулю (рисунок 16, *б*, кривые 3 и 2) в более жестких областях металлоконструкции (после 0,1 с). В то же время в области 1 наблюдается существенное различие значений, что связано с меньшей жесткостью рассматриваемой конструктивной области оболочки котла цистерны. Аналогичная временна̀я динамика зафиксирована при анализе напряжений в рассматриваемых областях.

Разработанный метод позволил решить важную с позиции обеспечения безопасности перевозки опасных грузов задачу по определению влияния ослабления стяжного хомута на НДС элементов крепления котла к раме с учетом перетекания перевозимого груза в котле. Установлено, что снизить значения напряжений в зоне среднего крепления котла на раме, расположенной со стороны разгружаемой консоли, возможно путем подбора значения предварительной затяжки хомутов и коэффициента трения в области консольных опор котла между броневым листом последнего и деревянными брусками.

С использованием разработанных компьютерных моделей кузова цистерны и применением метода подмоделей проведены исследования НДС элементов крепления котла с учетом свойств пластичности материала (рисунок 17). Определено, что снижение максимальных значений эквивалентных напряжений в зоне крепления рамной лапы со стороны соударения вагонов при учете свойств пластичности материала достигает 30 %. Остаточные напряжения в узле крепления котла к раме в средней части после воздействия нагрузок, соответствующих двойному ударному нагружению вагона, составили 18,8 МПа. Следует отметить, что при рассмотрении последующих циклов нагружения значения остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ и пластических деформаций $\varepsilon_{пл}$ остаются практически неизменными: $\sigma_{i\,ост} = \sigma_{i+2} - \sigma_i \to 0$; $\varepsilon_{i\,ост} = \varepsilon_{i+2} - \varepsilon_i \to 0$, где i – шаг нагружения, $i \geq 3$.

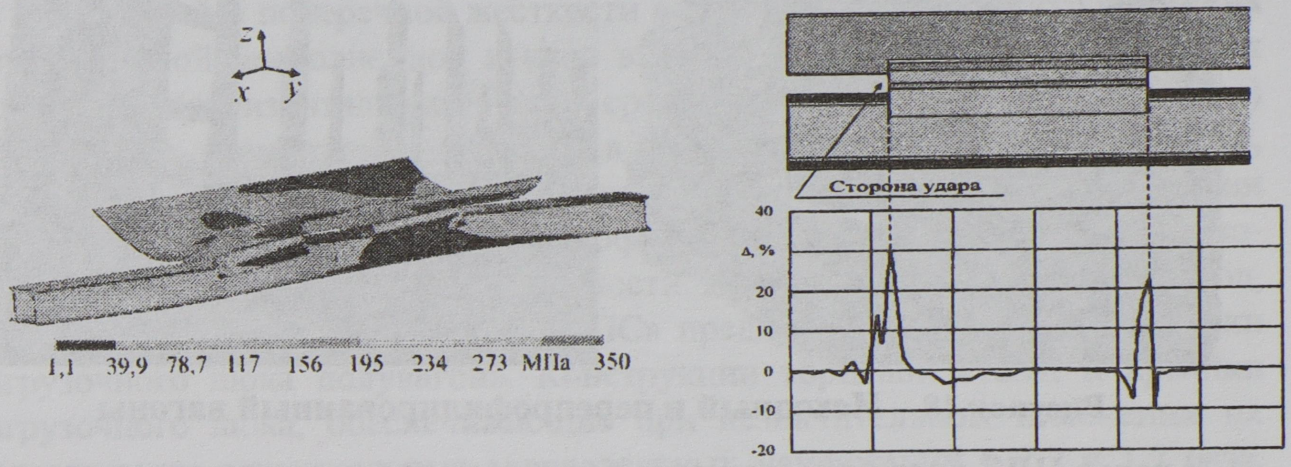


Рисунок 17 – НДС узла крепления котла на раме с учетом пластических деформаций и снижение значений эквивалентных напряжений по сравнению со случаем упругих деформаций

В **главе 6** «Разработка конструкций грузовых вагонов» на основе предложенной методологии дано обоснование перспективных технических решений для грузового подвижного состава. Выполненные исследования позволили осуществить проект перепрофилирования невостребованных вагонов бункерного типа для перевозки нефтебитума в вагон для перевозки лесных грузов (подана заявка на изобретение). На рисунке 18 показаны вагон для нефтебитума модели 17-494 (исходный) и перепрофилированный вагон-платформа для перевозки лесных грузов модели 17-494-01.

Предложенная конструкция вагона подвергалась многосторонним динамико-прочностным расчетам (виртуальным испытаниям) с использованием предложенных в диссертации методов и математических моделей. Срок службы принятой к производству конструкции перепрофилированного вагона составил 30 лет с отсчетом времени от момента постройки вагона базовой

модели 17-494, но результаты выполненных исследований показали, что несущая конструкция обладает запасом ресурса, и по истечении срока службы ее эксплуатация может быть продолжена при условии проведения работ, предусмотренных соответствующей нормативной документацией по продлению срока службы вагонов. Перепрофилированный вагон прошел необходимый объем испытаний, в том числе и сертификационных, выполненных с привлечением специалистов научно-внедренческого центра «Вагоны» (г. Санкт-Петербург). В вагонном депо Орша Белорусской железной дороги в 2008–2009 гг. перепрофилировано 157 вагонов, в настоящее время успешно эксплуатирующихся. Годовой экономический эффект в ценах 2009 г. составил более 2 млрд. руб.

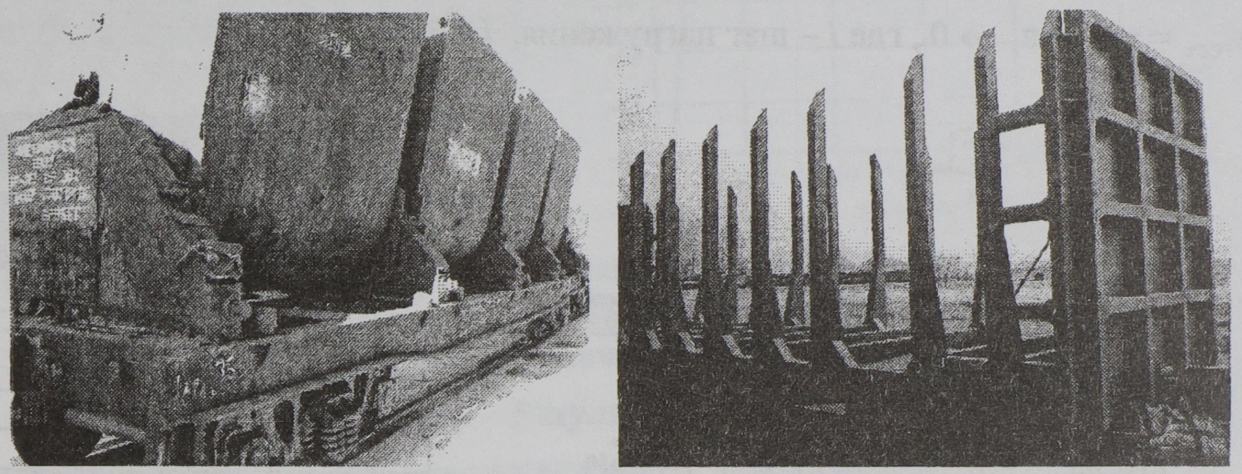


Рисунок 18 – Исходный и перепрофилированный вагоны

Анализ НДС вновь проектируемых вагонов для перевозки леса позволил выявить ряд опасных мест при разработке конструкции консольной части вагона, узлов сочленения стоек и оснований лесных рам, а также их креплений к боковым балкам, а расчеты показали уровень напряжений, существенно превышающий допускаемые значения, что связано с особенностями конструкции рассматриваемого типа подвижного состава: незамкнутость верхнего контура кузова вагона, большие значения действующих на консольную часть изгибающих моментов, относительно поперечной оси, проходящей через шкворневую балку и стойки лесных рам. Полученный опыт при перепрофилировании вагона для перевозки нефтебитума способствовал решению возникших трудностей путем поэтапного внесения конструктивных изменений с выполнением необходимых оценочных прочностных расчетов. Предложенная методология позволила обосновать разработанные конструкции кузовов вагонов-платформ для перевозки лесных грузов моделей 13-9832 и 13-9832-01, которые в отличие от первоначальных вариантов претерпели существенные изменения в части усиления консольной области вагона, торцевой стены, а также мест сочленения стоек и оснований лесных рам и их креплений к раме вагона, в то же время основные технико-экономические пара-

метры (грузоподъемность, объем кузова) остались без изменения. Опытные образцы вагонов моделей 13-9832 и 13-9832-01 с зональным габаритом погрузки прошли комплекс статических и динамических испытаний в рамках проведения работ по их сертификации на испытательном центре УО «БелГУТ». На СЗАО «Могилевский вагоностроительный завод» начат серийный выпуск указанных моделей вагонов.

Выполненные исследования НДС конструкции торцевой стены полувагона показали ее несоответствие современным требованиям прочности, что подтверждается появлением в процессе их эксплуатации повреждений (трещин по основному металлу элементов и сварным швам, остаточные деформации металлической обшивки и всей конструкции в целом). Обоснована и предложена новая конструкция торцевой стены полувагона, содержащая металлическое полотно гладкой обшивки и подкрепляющие элементы (балки) продольной и поперечной жесткости и отличающаяся тем, что снабжена несущей рамой, выполненной в виде взаимно перпендикулярных четырех поперечных (горизонтальных), двух средних продольных (вертикальных) усиливающих элементов с сечением в виде замкнутых гнутых профилей, имеющих меньшую массу по сравнению с используемыми в вагоностроении горячекатаными корытообразными профилями и достаточную несущую способность по заданным условиям прочности. Используя аналогичный подход, авторский коллектив ОНИЛ «ТТОРЕПС» предложил конструкцию крышки разгрузочного люка полувагона. Конструкции торцевой стены и крышки разгрузочного люка, обеспечивающие при незначительном изменении их масс снижение максимальных эквивалентных напряжений в 2,2 и 1,7 раза, соответственно, использованы при проектировании и изготовлении опытного образца на основе полувагона модели 12-9763. На испытательном центре УО «БелГУТ» выполнены статические и динамические испытания полувагона в рамках проведения работ по его сертификации.

Разработанный подход решения задачи прочности крышки люка при ударных воздействиях был применен при определении необходимого усилия для изготовления гофрированного листа крышки люка методом холодной штамповки и последующего подбора прессового оборудования. На основании выполненных исследований сделан вывод, что при использовании пресса с рабочим значением силы 150 кН формовка гофр на глубину 30 мм может быть выполнена только при использовании стали с пределом текучести, не превышающим 380 МПа. В то же время весьма незначительное (на 1 мм) уменьшение глубины внедрения штампа ведет к уменьшению значения потребной силы на 70 %. Для снижения значений потребных сил также возможны следующие пути: выбор смазки, обеспечивающей снижение коэффициента трения между инструментом и обрабатываемой деталью, а также увеличение радиуса кривизны прижима в области его начального контакта с формуемой деталью.

Результаты выполненных в главе 4 исследований НДС кузова вагона модели 19-9774 для перевозки минеральных удобрений показали, что его конструкция требует переработки. Поэтому в работе предложена новая конструкция кузова, отличающаяся усиленной торцевой стеной, дугами крыши и верхней обвязкой боковой стены. Прочностные расчеты подтвердили, что при незначительном увеличении массы тары вагона максимальные эквивалентные напряжения снижаются более чем в 2 раза (рисунок 19). Конструкция вагона, построенного на СЗАО «Могилевский вагоностроительный завод», прошла весь комплекс сертификационных испытаний и в настоящее время находится в серийном производстве.

Предложенная методология позволила решить ряд проблемных вопросов, касающихся повышения надежности конструкции стратегически важного для Республики Беларусь наливного подвижного состава. К недостатку крепления котла цистерны на раме при помощи стяжных хомутов для предотвращения вертикальных и поперечных перемещений в концевых частях котла при переходных режимах движения следует отнести появление неисправностей, связанных с их обрывом, вследствие чего возникают высокие напряжения в области крепления в средней части, приводящие к появлению трещин. Одной из причин указанных обрывов является скручивание плоских поясов при затяжке хомутов, которое сопровождается большими деформациями. Решение описанной проблемы осуществлено путем разработки вариантов специальных устройств для предотвращения скручивания пояса стяжного хомута вагона-цистерны при выполнении операции затяжки последнего, и способа совершенствования узла крепления котла на раме в средней части, позволяющего снизить значения эквивалентных напряжений в области приварки рамной лапы к хребтовой балке на 40 %.

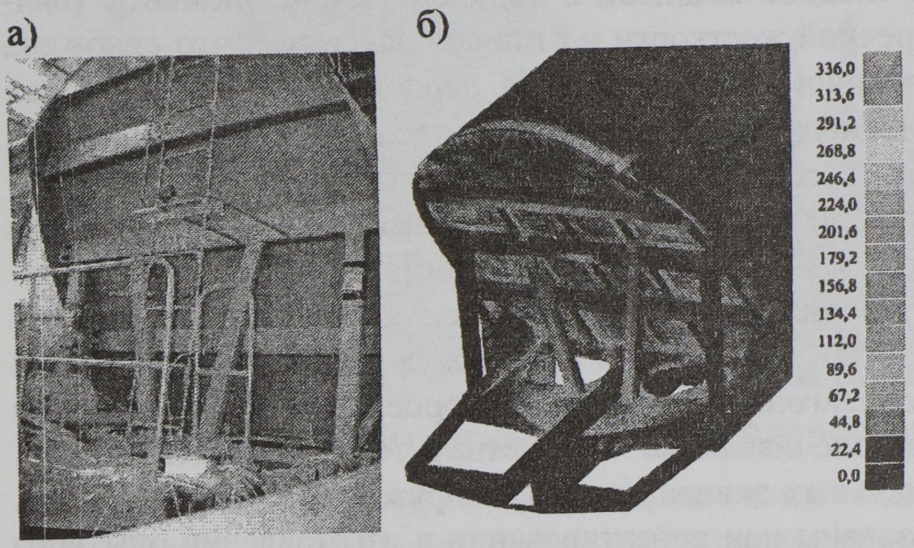


Рисунок 19 – Новая конструкция (а) и ее НДС при ударном нагружении (б)

Одним из обязательных требований проектирования перспективных конструкций вагонов-цистерн является наличие устройства для слива нефтепродуктов, обеспечивающего три степени защиты от утечки жидкого груза.

Один из предложенных вариантов конструкций таких устройств отличается от типовой конструкции тем, что имеет размещенный внутри цилиндрической части корпуса между верхним запорным клапаном и ступенчатой наружной крышкой дополнительный промежуточный затвор в виде короткого поршня, снабжённого центральным стяжным болтом, прижимным диском и направляющими соосного перемещения последнего относительно поршня при вращении стяжного болта, а между головкой поршня и внутренней поверхностью нажимного диска установлено эластичное кольцо уплотнения по внутренней окружности корпуса сливного прибора (рисунок 20). Разработанные конструкции устройств для нижней разгрузки котла вагона-цистерны с тройным запиранием проходного отверстия сливного прибора могут быть реализованы на вагоноремонтных предприятиях.

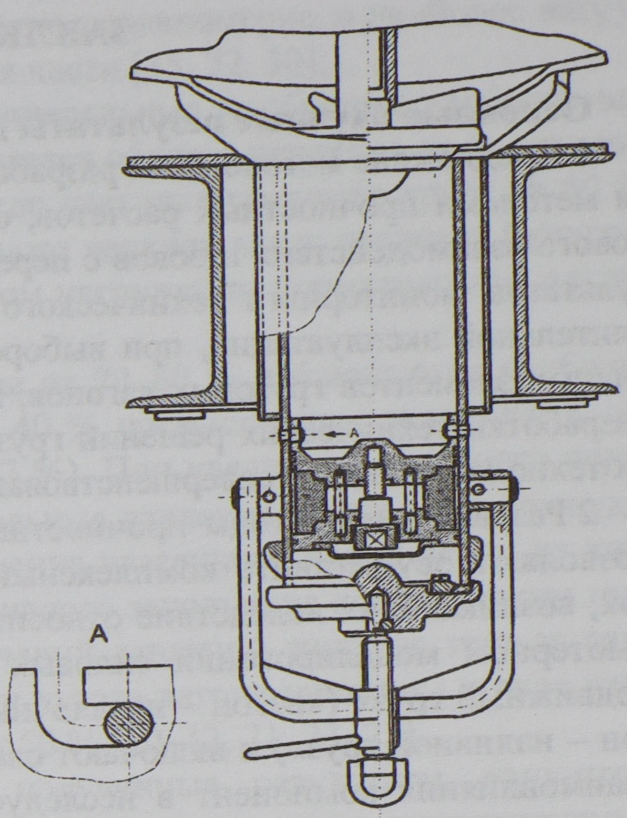


Рисунок 20 – Сливной прибор вагона-цистерны

Анализ гидродинамической нагруженности котла железнодорожной цистерны показал, что при заполнении котла жидким грузом на 90–97 % при торможении вагона в области люка-лаза образуются локальные очаги давлений жидкости, значения которых существенно превышают испытательное давление. Предложена конструкция котла железнодорожной цистерны, отличающаяся устройством наливного люка-лаза и наличием дополнительных поперечных шпангоутов с рациональным их размещением в продольном направлении котла. Новая конструкция люка-лаза позволяет снизить гидродинамические нагрузки в рассматриваемой области до 40 %, а постановка шпангоутов со значением момента сопротивления поперечного сечения последнего 6–9 $см^3$ на расстоянии 1,5 м от поперечной плоскости симметрии котла приводит к обеспечению наиболее высокого значения коэффициента запаса устойчивости его цилиндрической оболочки при условии выполнения требований прочности. Описанная конструкция котла используется при проектировании новых моделей железнодорожных цистерн для перевозки нефтепродуктов СЗАО «Осиповичский вагоностроительный завод» и Андижанским механическим заводом УП «Узжелдорреммаш» Государственно-акционерной железнодорожной компании «Узбекистон темир йуллари».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1 Предложена методология разработки конструкций вагонов, отличающаяся методами прочностных расчетов, обеспечивающих комплексный учет силового взаимодействия кузовов с перевозимыми грузами и использование результатов мониторинга технического состояния подвижного состава после длительной эксплуатации, при выборе направлений модификации конструктивных элементов грузовых вагонов, которая представляет собой основу для разработки технических решений грузового подвижного состава, повышения их технологичности и совершенствования методов испытаний [2, 24, 25].

2 Разработаны методы прочностных расчетов кузовов вагонов, которые позволяют осуществить комплексный учет реальных динамических нагрузок, возникающих вследствие относительного перемещения груза, при компьютерном моделировании силовых взаимодействий в системе «вагон – подвижный груз» («вагон – навалочный груз», «вагон – сыпучий груз», «вагон – наливной груз») и включают следующие этапы, обеспечивающие учет взаимовлияния компонент в исследуемой системе: 1) создание динамических моделей, учитывающих силовое взаимодействие кузова и груза; 2) определение реального силового нагружения кузова; 3) определение напряженно-деформированного состояния кузовов вагонов с учетом их взаимодействия с перевозимыми грузами. Их реализация позволила определить напряженно-деформированное состояние кузовов вагонов с учетом силового взаимодействия с перевозимыми грузами при изменении степени заполнения кузова различными по роду грузами, а также реального технического состояния металлоконструкции вагона [1–4, 9, 13, 14, 18, 20, 26, 29, 31, 32].

3 В ходе выполнения теоретических и натурных экспериментальных исследований получены результаты реального силового нагружения кузовов вагонов-платформ для перевозки леса, полувагонов, вагонов бункерного типа и вагонов-цистерн. В частности, установлено:

– динамические нагрузки на торцевую стену вагона-платформы для перевозки леса носят неравномерный характер распределения, а их максимальные значения реализуются при набегании вагона-платформы на заторможенный сцеп вагонов (вагоны подпора), если зазор между стеной и грузом составляет 0,070-0,095 м [27, 28, 31];

– распределение действующего силового поля от перевозимого сыпучего груза по элементам кузова полувагона при ударном нагружении: 63 % продольной нагрузки, обусловленной действием сыпучего груза, воспринимает торцевая стена, 23 % – пол и 14 % – боковые стены, причем основная доля нагрузки на пол и боковые стены приходится на 1/5 часть длины кузова со стороны соударения, что прежде в расчетах не учитывалось; давление по торцевой стене от сыпучего груза при соударении вагонов в отличие от нор-

мативной схемы нагружения распределено неравномерно и наиболее нагруженными являются ее средняя и верхняя части [15, 22, 30];

– в кузове вагона для перевозки минеральных удобрений наиболее нагруженной при соударении вагонов является область перехода от наклонной к вертикальной зоне торцевой стены, где давление сыпучего груза на 60 % превышает нормативное значение, а также верхняя часть среднего бункера, где распределение давления при ударном нагружении нормативом не регламентировано [22, 30];

– при наливе котла вагона-цистерны на 70–80 % наблюдаются наибольшие давления жидкости на днище, на 40 % превышающие значения, соответствующие нормативному наливу (97 %). При увеличении вязкости перевозимого груза до 0,4 кг/(м·с) максимальные давления также соответствуют 70–80 % налива, но наблюдается снижение указанного превышения их значений по отношению к случаю нормативного заполнения котла жидким грузом. Уточнение кратковременных значений давлений жидкого тела за счет учета деформаций металлоконструкции кузова вагона-цистерны в ряде наиболее нагруженных областей достигает 50 % [10–12, 21, 23, 25].

4 Выполненные исследования и полученные результаты динамико-прочностных расчетов кузовов эксплуатируемых и вновь проектируемых вагонов при перевозке навалочных, сыпучих и наливных грузов с учетом взаимодействий в системе «вагон – подвижный груз» позволили выявить проблемные конструктивные зоны и выработать технические решения по созданию новых конструкций, а также предложить более эффективную схему испытаний грузовых вагонов на прочность при соударении [5–7, 16, 21, 24, 25, 28, 29, 32].

5 Применение методов и математических моделей, полученных при реализации предложенной методологии, позволило разработать и обосновать комплекс технических решений, отвечающих современным требованиям прочности, который включает конструкции [1, 2, 8, 16, 17, 19, 24, 25, 27, 31, 100–108]:

– вагона для перевозки лесных грузов модели 17-494-01, полученной путем перепрофилирования невостребованных вагонов бункерного типа для перевозки нефтебитума модели 17-494, и вагонов-лесовозов моделей 13-9832 и 13-9832-01 с зональным габаритом погрузки, отличающихся усиленными консольными частями, торцевыми стенами, а также узлами сочленения стоек и оснований лесных рам и их креплений к раме вагона;

– торцевой стены и крышки разгрузочного люка полувагона с использованием гнутых элементов жесткости и гладкой обшивки и технологически пригодные для изготовления в рамках мощностей вагоноремонтных предприятий;

– кузова вагона для перевозки минеральных удобрений модели 19-9774, отличающейся усиленной конструкцией торцевой стены, дугами крыши и верхней обвязкой боковой стены;

– устройств для предотвращения скручивания пояса стяжного хомута ва-

гона-цистерны при выполнении операции затяжки последнего;

– устройств для нижней разгрузки котла вагона-цистерны с тройным запиранием проходного отверстия сливного прибора, отличающихся простотой реализации без принципиального изменения эксплуатируемой конструкции сливного прибора;

– котла железнодорожной цистерны, отличающегося наличием дополнительных поперечных шпангоутов с рациональным их размещением в продольном направлении котла и устройством наливного люка-лаза. Установлено, что постановка шпангоутов со значением момента сопротивления поперечного сечения от 6 до 9 $см^3$ на расстоянии 1,5 м от поперечной плоскости симметрии котла приводит к обеспечению наиболее высокого значения коэффициента запаса устойчивости цилиндрической оболочки при условии выполнения требований прочности, а предлагаемая конструкция люка-лаза позволяет снизить гидродинамические нагрузки в рассматриваемой области до 40 % в зависимости от уровня заполнения котла жидким грузом.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Предложенная методология может быть использована при проектировании и совершенствовании конструкций грузовых вагонов. Разработанные технические решения, новизна и полезность которых защищена девятью патентами, рекомендованы вагоностроительным и вагоноремонтным предприятиям для внедрения. Методика испытаний МИ.АЛВЯ.3802.004–2008 «Оценка прочности вагонных конструкций при соударениях» полезна организациям, занимающимся испытаниями железнодорожного подвижного состава.

Результаты работы нашли применение:

– на ОАО «Белорусский автомобильный завод», СЗАО «Могилевский вагоностроительный завод» при проектировании и серийном производстве вагонов-хопперов модели 19-9774 для перевозки минеральных удобрений, универсальных полувагонов модели 12-9763 и вагонов-платформ моделей 13-9832 и 13-9832-01 для перевозки лесных грузов;

– СЗАО «Осиповичский вагоностроительный завод» и Андижанском механическом заводе УП «Узжелдорреммаш» Государственно-акционерной железнодорожной компании «Узбекистон темир йуллари» при проектировании новых моделей железнодорожных цистерн для перевозки нефтепродуктов;

– Белорусской железной дороге при реализации проекта по перепрофилированию бункерных вагонов для перевозки битума модели 17-494 в вагоны-платформы для перевозки лесных грузов модели 17-494-01 в Оршанском вагонном депо. Годовой экономический эффект от переоборудования 157 вагонов по состоянию на 2009 г. составил более 2 млрд руб.;

– в учебном процессе УО «БелГУТ» при подготовке инженеров-механиков по специальности «Подвижной состав».

Внедрение результатов работы подтверждено соответствующими актами.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Монографии

1 Сенько, В. И. Прочность кузова железнодорожной цистерны с учетом перемещения перевозимого жидкого груза / В. И. Сенько, А. В. Путято, А. О. Шимановский. – Гомель : УО «БелГУТ», 2006. – 210 с.

2 Путято, А. В. Теория и практика совершенствования конструкций кузовов вагонов с учетом взаимодействия с перевозимыми грузами / А. В. Путято. – Гомель : УО «БелГУТ», 2011. – 295 с.

Статьи в научных журналах

3 Путято, А. В. Конечно-элементное моделирование котла железнодорожной цистерны с использованием программного комплекса ANSYS / А. В. Путято // Машиностроение. – Мн., 2002. – Вып. 18. – С. 491–495.

4 Путято, А. В. Особенности конечноэлементного моделирования рамы железнодорожной цистерны / А. В. Путято // Машиностроение. – Мн., 2003. – Вып. 19. – С. 712–716.

5 Путято, А. В. Влияние натяжения стяжных хомутов железнодорожной цистерны на напряжения в областях крепления котла к раме / А. В. Путято // Машиностроение. – Мн., 2004. – Вып. 20. – С. 233–237.

6 Путято, А. В. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния железнодорожной цистерны при движении по кривой / А. В. Путято // Известия Белорусской инженерной академии, 2003. – №1(15)/1. – С. 170–173.

7 Сенько, В. И. Влияние перетекания жидкости в котле цистерны на напряженно-деформированное состояние ее рамы / В. И. Сенько, А. В. Путято // Известия Белорусской инженерной академии, 2004. – № 1(17)/1. – С. 96–99

8 Сенько, В. И. Исследование путей повышения прочности деталей креплений котла к раме железнодорожной цистерны / В. И. Сенько, А. О. Шимановский, А. В. Путято // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2004. – № 1. – С. 169–172.

9 Сенько, В. И. Уточненная конечно-элементная модель четырехосной железнодорожной цистерны / В. И. Сенько, А. О. Шимановский, А. В. Путято // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2004. – № 1. – С. 7–10.

10 Шимановский, А. О. Численное определение значений давления жидкости в котле цистерны при ее мгновенной остановке / А. О. Шимановский, А. В. Путято // Теория и практика машиностроения. – 2005. – № 2. – С. 75–78.

11 Шимановский, А. О.Моделирование перетекания жидкости в резервуаре с использованием программных комплексов ANSYS и STAR-CD / А. О. Шимановский, А. В. Путято // Вестник Уральского государственного

технического университета – УПИ. Компьютерный инженерный анализ. – 2005. – №11 (63). – С. 103–110.

12 Шимановский, А. О. Гидродинамическая нагруженность котла железнодорожной цистерны при соударении вагонов / А. О. Шимановский, А. В. Путято // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – Т. 10. – № 3. – С. 45–48.

13 Шимановский, А. О. Колебания цистерны с жидкостью при переходных режимах движения / А. О. Шимановский, А. В. Путято // Надежность и долговечность машин и сооружений: международный научн.-техн. сб. – Вып. 26. – Киев : Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2006. – С. 123–128.

14 Шимановский, А. О. Моделирование колебаний жидкости в транспортном резервуаре с перегородками / А. О. Шимановский, А. В. Путято // Автомобильный транспорт: сб. научн. тр. – Харьков : ХНАДУ, 2006. – Вып. 19. – С. 35–37.

15 Путято, А. В. Моделирование статической и динамической загруженности кузова вагона сыпучим грузом / А. В. Путято: Зб. наук. праць – Харків : УкрДАЗТ, 2007. – Вып. 82. – С. 99–104.

16 Совершенствование элементов конструкций подвижного состава для перевозки жидких и сыпучих грузов / В. И. Сенько, А. В. Путято, И. Л. Чернин, А. В. Пигунов, Н. Г. Сенько, В. В. Белогуб // Механика машин, механизмов и материалов. – 2007. – № 1(1). – С. 43–47.

17 Рациональные металлоконструкции кузовов грузовых вагонов / И. Л. Чернин, А. В. Пигунов, А. В. Путято, Н. Г. Сенько // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2007. – №1-2(14-15). – С. 113–116.

18 Shimanovsky, A. Modeling of vehicle dynamics considering load relative movement / A. Shimanovsky, A. Putsiata, O. Kolomnikova // Acta Mechanica Slovaca. – 2008. – № 3-B. – P. 691–703.

19 Повышение надежности элементов конструкций вагонов-цистерн для наливных грузов / В. И. Сенько, И. Л. Чернин, А. В. Путято, А. В. Пигунов, Н. Г. Сенько // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2008. – №1 (16). – С. 5–12.

20 Путято, А. В. Компьютерное моделирование гидродинамической нагруженности области люка-лаза вагона-цистерны / А. В. Путято // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого. – 2009. – №1 (36). – С. 79–86.

21 Путято, А. В. Расчет на прочность котла вагона-цистерны с учетом решения задачи гидроупругости / А. В. Путято // Зб. наук. прац. – Харків : УкрДАЗТ, 2009. – Вып. 108. – С. 115–120.

22 Сенько, В. И. Оценка воздействия перевозимых сыпучих грузов на кузова вагонов / В. И. Сенько, А. В. Путято // Вестник Днепропетровского на-

ционального университета железнодорожного транспорта им. акад. В. А. Лазаряна. – 2009. – Вып. 30. – С. 214–222.

23 Сенько, В. И. Определение нагруженности котла вагона-цистерны с учетом взаимодействия с жидким грузом / В. И. Сенько, А. В. Путято // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2009. – № 2 (19). – С. 4–7.

24 Путято, А. В. Совершенствование элементов конструкций вагона-цистерны с учетом взаимодействия с перевозимым жидким грузом / А. В. Путято // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – № 1(25). – С. 113–121.

25 Сенько, В. И. Совершенствование конструкций вагонов с учетом взаимодействия с перевозимыми грузами / В. И. Сенько, А. В. Путято // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2010. – № 3. – С. 9–13.

26 Путято, А. В. Компьютерное моделирование продольной динамики железнодорожных цистерн с учетом возможного недолива котла / А. В. Путято // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2010. – № 2 (21). – С. 10–15.

27 Сенько, В.И. Перепрофилирование вагона бункерного типа в вагон-платформу для перевозки лесных грузов / В. И. Сенько, А. В. Путято // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 2. – С. 48–52.

28 Путято, А. В. Особенности расчета на прочность вагона-платформы для перевозки лесных грузов / А. В. Путято // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2011. – № 1 (22). – С. 13–18.

29 Путято, А. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния крышки люка полувагона при воздействии ударных нагрузок / А. В. Путято, О. И. Якубович // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 2(30). – С. 179–185.

30 Экспериментальное определение давления сыпучего груза на торцевую стену полувагона при ударном нагружении / В. И. Сенько, А. В. Путято, В. В. Белогуб, С. В. Макеев // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2011. – № 2 (23). – С. 5–8.

31 Путято, А. В. Моделирование динамической нагруженности кузова вагона-платформы для перевозки лесных грузов / А. В. Путято // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2011. – № 2 (23). – С. 9–11.

32 Путято, А. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния железнодорожной цистерны при ударном нагружении с учетом нарушения крепления котла к раме / А. В. Путято // Вестник Севастопольского национального технического университета. – 2011. – Вып. 120. – С. 312–316.

Статьи в сборниках научных трудов, материалах конференций

33 Сенько, В. И. Расчетная схема приложения силовых факторов к конструкции цистерны при ее движении в кривой / В. И. Сенько, А. О. Шимановский, А. В. Путято // Безопасность движения поездов: тр. науч.-практ. конф. – М. : МИИТ, 2003. – С. IV-79–IV-80.

34 Путято, А. В. Особенности построения конечноэлементной модели железнодорожной цистерны с использованием программного комплекса ANSYS / А. В. Путято // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: матер. VI респ. науч. конф. студ. и аспир. – Гомель : УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2003. – С. 43–44.

35 Путято, А. В. Конечноэлементное моделирование железнодорожной цистерны с использованием программного комплекса ANSYS / А. В. Путято // Сборник материалов III Международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и магистрантов – Гомель : УО «ГГТУ им. П.О. Сухого», 2003. – С. 25–28.

36 Путято, А. В. Применение методов подмоделей и подконструкций к исследованию прочности железнодорожной цистерны / А. В. Путято // Современные проблемы математики и вычислительной техники: материалы III респ. науч. конф. мол. уч. и студ. – Брест : УО «БГТУ», 2003. – С. 108–110.

37 Путято, А. В. Моделирование и расчет котла и рамы нефтебензиновой железнодорожной цистерны с использованием программного комплекса ANSYS / А. В. Путято // Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Могилев : МГТУ, 2003. – с. 476–477.

38 Путято, А. В. Исследование влияния особенностей моделирования консольного опирания котла в железнодорожной цистерне на напряженно-деформированное состояние элементов конструкции / А. В. Путято // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы VII респ. науч. конф. студ. и аспир. – Гомель : УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2004. – С. 101–102.

39 Путято, А. В. Определение значений предельных коррозионных повреждений листов оболочки котла цистерны по критерию прочности / А. В. Путято // Подвижной состав железнодорожного транспорта: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Гомель: БелГУТ, 2004. – С. 58–61.

40 Путято, А. В. Анализ напряженно-деформированного состояния котла железнодорожной цистерны под действием гидродинамических нагрузок / А. В. Путято // Современные методы проектирования машин: респ. межвед. сб. научн. тр. В 7 т. Т. 4. – Мн. : УП «Технопринт», 2004. – Вып. 2. – С. 110–113.

41 Путято, А. В. Оценка прочности узлов крепления котла на раме железнодорожной цистерны с учетом перетекания жидкости в котле / А. В. Путято // Безопасность движения поездов: тр. V науч.-практ. конф. – М. : МИИТ, 2004. – С. X-9–X-10.

42 Сенько, В. И. Напряженно-деформированное состояние кузова вагона-цистерны с учетом коррозионных повреждений / В. И. Сенько, А. О. Шимановский, А. В. Путято // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. В 2 ч. Ч. 2. – Могилев : ГУ ВПО «БРУ», 2004. – С. 130–131.

43 Проектирование металлоконструкций подвижного состава / В. И. Сенько, И. Л. Чернин, А. В. Пигунов, А. В. Путято, В. В. Белогуб // Проблемы безопасности на транспорте: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : УО «БелГУТ», 2005. – С. 82–84.

44 Шимановский, А. О. Особенности гидродинамического нагружения верхней части котла вагона-цистерны / А. О. Шимановский, А. В. Путято // Проблемы безопасности на транспорте: материалы III Междунар. научн.-практ. конф. – Гомель : УО «БелГУТ», 2005. – С. 95–97.

45 Шимановский, А. О. Распространение волн с избыточным гидродинамическим давлением в котле железнодорожной цистерны / А. О. Шимановский, А. В. Путято // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. В 2 т. Т. 1. – Красноярск : Изд-во «Гротеск», 2005. – С. 530–534.

46 Проектирование металлоконструкций подвижного состава по принципу равнопрочных элементов / В. И. Сенько, И. Л. Чернин, А. В. Пигунов, Н. Г. Сенько, А. В. Путято // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. В 2 т. Т. 1. – Красноярск : Изд-во «Гротеск», 2005. – С. 534–538.

47 Шимановский, А. О. Оптимизация геометрических параметров элементов конструкции кузова железнодорожной цистерны / А. О. Шимановский, А. В. Путято // Вычислительная механика деформируемого твердого тела: тр. междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. Т. 2. – М. : МИИТ, 2006. – С. 443–446.

48 Путято, А. В. Особенности формирования расчетных моделей для анализа перетекания жидкого груза в котле железнодорожного вагона-цистерны / А. В. Путято // Механика. Теория, задачи, учебно-методические разработки: сб. науч. тр. – Гомель: УО «БелГУТ», 2006. – С. 86–92.

49 Путято, А. В. Разработка конструктивных мероприятий по повышению надежности элементов конструкции вагонов-цистерн на основе методов компьютерного моделирования / А. В. Путято // Mokslas – Lietuvos ateitis: сб. докл. 9-й конф. молодых ученых – Вильнюс: Техника, 2006. – С. 206–212.

50 Шимановский, А. О. Конечно-элементное моделирование нагруженности резервуаров для транспортирования нефтепродуктов / А. О. Шимановский, А. В. Путято // Методы компьютерного проектирования и расчета нефтяного и газового оборудования: сб. материалов III Рос. межвуз. конф. с междунар. уч. – Тюмень : Изд-во «Нефтегазовый университет», 2006. – С. 169–174.

51 Модернизация универсального сливного прибора вагона-цистерны / В. И. Сенько, А. В. Путято, И. Л. Чернин, А. В. Пигунов, В. В. Белогуб // Наука, инновации, образование: актуальные проблемы развития транспорт-

ного комплекса России: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург : УрГУПС, 2006. – С. 241–242.

52 Совершенствование элементов конструкций железнодорожных цистерн / В. И. Сенько, А. В. Путято, И. Л. Чернин, А. В. Пигунов, Н. Г. Сенько // Наука, инновации, образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург : УрГУПС, 2006. – С. 242–244.

53 Рациональные конструкции сборочных единиц кузовов вагонов / В. И. Сенько, И. Л. Чернин, А. В. Путято, А. В. Пигунов, В. В. Свириденко // Наука, инновации, образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург : УрГУПС, 2006. – С. 244–245.

54 Шимановский, А. О. Влияние геометрических параметров перегородок на колебания жидкости в резервуаре автоцистерны / А. О. Шимановский, А. В. Путято // Политранспортные системы: материалы IV Всерос. научн.-техн. конф. В 2 ч. Ч. 2. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. – С. 158–160.

55 Путято, А. В. Определение остаточных деформаций и напряжений в узле крепления котла к раме вагона-цистерны / А. В. Путято // Проблемы и перспективы развития вагоностроения: материалы науч.-практ. конф. – Брянск : БГТУ, 2006. – С. 74–76.

56 Путято, А. В. Нагруженность кузова вагона при транспортировке сыпучих грузов / А. В. Путято, А. О. Шимановский // Теоретическая и прикладная механика: межвед. сб. науч.-метод. ст. – Мн.: БНТУ, 2007. – Вып. 22. – С. 149–151.

57 Путято, А. В. Определение внешнего критического давления оболочки котла вагона-цистерны / А. В. Путято // Теоретическая и прикладная механика: межвед. сб. науч.-метод. ст. – Мн. : БНТУ, 2007. – Вып. 22. – С. 152–156.

58 Путято, А. В. Методы моделирования и расчетные схемы нагруженности кузовов вагонов при перевозке сыпучих грузов / А. В. Путято, В. В. Белогуб // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. научн. тр. – Гомель : УО «БелГУТ», 2007. – Вып. 1. – С. 45–53.

59 Путято, А. В. Особенности нагруженности кузова полувагона сыпучим грузом / А. В. Путято // Проблемы безопасности на транспорте: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : УО «БелГУТ». – 2007. – С. 84–85.

60 Исследование напряженно-деформированного состояния наиболее повреждаемых в эксплуатации элементов конструкции универсального полувагона / В. И. Сенько, А. В. Пигунов, И. Л. Чернин, А. В. Путято // Проблемы безопасности на транспорте: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : УО «БелГУТ». – 2007. – С. 88–89.

61 Путято, А. В. Расчет узла крепления котла на раме вагона-цистерны с учетом зон пластических деформаций / А. В. Путято // Актуальные проблемы прочности: материалы XLVI Междунар. конф. В 2 ч. Ч. 2. – Витебск : УО «ВГТУ», 2007. – С. 85–90.

62 Путято, А. В. Компьютерное моделирование нагруженности кузова полувагона сыпучим грузом при ударном взаимодействии вагонов /

А. В. Путято // Механика-2007: сб. науч. тр. III Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике. – Мн. : ОИМ НАНБ, 2007. – С. 242–247.

63 Путято, А. В. Расчет на прочность кузова вагона-платформы для перевозки лесных грузов при ударе / А. В. Путято, А. В. Пигунов, В. В. Белогуб // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. науч. тр. – Гомель : УО «БелГУТ», 2008. – Вып. 2. – С. 53–58.

64 Путято, А. В. Моделирование нагруженности кузова вагона сыпучим грузом в твердотельной постановке / А. В. Путято, В. В. Белогуб // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : УО «БелГУТ», 2008. – С. 176–177.

65 Путято, А. В. Моделирование нагруженности кузова вагона сыпучим грузом в твердотельной постановке / А. В. Путято // Инновации в машиностроении: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Мн. : ОИМ НАНБ, 2008. – С. 341–345.

66 Шимановский, А.О. Анализ эффективности демпфирования колебаний жидкости в резервуарах цистерн / А. О. Шимановский, А. В. Путято, О. И. Якубович // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. науч. тр. – Гомель : УО «БелГУТ», 2009. – Вып. 3. – С. 144–149.

67 Шимановский, А. О. Совершенствование конструкции котла железнодорожной цистерны с учетом особенностей различных вариантов нагружения / А. О. Шимановский, А. В. Путято // Механика-2009: сб. науч. тр. IV Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике – Мн. : ОИМ НАНБ, 2009. – С. 212–216.

68 Сенько, В. И. Численный анализ нагруженности кузова вагона бункерного типа сыпучим грузом / В. И. Сенько, А. В. Путято, С. В. Шестаков // Механика-2009: сб. научн. тр. IV Белорусского конгресса по теор. и прикл. мех-ке. – Мн. : ОИМ НАНБ, 2009. – С. 228–233.

69 Путято, А. В. Компьютерное моделирование динамики сыпучего груза в вагоне в плоской твердотельной постановке / А. В. Путято // Вестник Тульского государственного университета. Сер. «Актуальные вопросы механики». – 2010. – С. 226–230.

70 Путято, А. В. К вопросу о нормативном нагружении кузова вагона сыпучим грузом при расчете на прочность / А. В. Путято // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. науч. тр. – Гомель : УО «БелГУТ», 2010. – Вып. 4. – С. 129–135.

71 Конечноэлементное моделирование процесса холодной штамповки крышки люка полувагона / О. И. Якубович, А. О. Шимановский, А. В. Путято, А. И. Кебиков // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: Междунар. сб. науч. тр. – Гомель: УО «БелГУТ», 2010. – Вып. 4. – С. 144–149.

72 Проблемы белорусского вагоностроения и эффективные пути их решения / В. И. Сенько, В. А. Осипов, А. В. Путято, А. В. Пигунов, Л. В. Сенько // Трибофатика = Tribo-fatigue : тр. VI Междунар. симп. по трибофатике МСТФ–2010. В 2 ч. Ч. 1. – Мн. : БГУ, 2010. – С. 347–350.

73 Сенько, В. И. Взаимодействие Белорусского государтсвенного университета транспорта с вагоностроительными предприятиями Республики Беларусь / В. И. Сенько, А. В. Путято // Проблемы безопасности на транспорте: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : УО «БелГУТ», 2010. – С. 8–11.

74 Путято, А. В. Оценка нагруженности кузова вагона для перевозки минеральных удобрений при взаимодействии с грузом / А. В. Путято // Проблемы безопасности на транспорте: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : УО «БелГУТ», 2010. – С. 137–138.

75 Путято, А. В. Свободные колебания оболочки котла железнодорожной цистерны с жидкостью / А. В. Путято // Проблемы безопасности на транспорте: материалы V Междунар. научн.-практ. конф. – Гомель : УО «БелГУТ», 2010. – С. 138–139.

76 Путято, А. В. Компьютерное моделирование динамики железнодорожной цистерны с жидкостью при ударе / А. В. Путято, Е. О. Железко, А. Д. Дудко // Проблемы безопасности на транспорте: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : УО «БелГУТ», 2010. – С. 139 – 140.

77 Расчет сил, необходимых для изготовления гофрированных листов крышек люков полувагонов / О. И. Якубович, А. О. Шимановский, А. В. Путято, А. И. Кебиков // Проблемы безопасности на транспорте: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : УО «БелГУТ», 2010. – С. 163–164.

78 Путято, А. В. Моделирование продольной динамики железнодорожной цистерны с жидкостью / А. В. Путято // Проблемы та перпективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. – Киев : ДЕДУТ, 2011. – С. 120–122.

79 Путято, А. В. Моделирование прочности кузова вагона-цистерны при ударном нагружении с учетом нарушения крепления котла к раме / А. В. Путято // Прочность материалов и элементов конструкций: тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Киев : Ин-т пробл. прочн. им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 540–546.

80 Якубович, О. И. Моделирование упруго-пластического деформирования листового металла при холодной штамповке / О. И. Якубович, А. О. Шимановский, А. В. Путято // Прочность материалов и элементов конструкций: тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Киев : Ин-т пробл. прочн. им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 448–453.

Тезисы докладов конференций

81 Путято, А. В. Расчет напряжений в элементах конструкции котла железнодорожной цистерны / А. В. Путято // Проблемы безопасности на транспорте: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : УО «БелГУТ», 2002. – С. 89–90.

82 Путято, А. В. Моделирование и расчет креплений котла к раме железнодорожной цистерны / А. В. Путято // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1. – Гомель : УО «БелГУТ», 2003. – С. 44.

83 Путято, А. В. Компьютерное моделирование связей котла с рамой железнодорожной цистерны / А. В. Путято // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: тез. докл. II Гомельск. регион. конференция молодых ученых – Гомель : ИММС НАНБ, 2003. – С. 101–103.

84 Путято, А. В. Моделирование взаимодействия перевозимой жидкости с котлом железнодорожной цистерны / А. В. Путято // Lietuva be mocslo – Lietuva be ateities: тез. докл. 7-й конф. молодых ученых Литвы. – Вильнюс : Техника, 2004. – С. 204–209.

85 Сенько, В. И. Методика распределения давления жидкого груза в котле при проведении прочностных расчетов железнодорожной цистерны / В. И. Сенько, А. О. Шимановский, А. В. Путято // Проблемы механики железнодорожного транспорта: динамика, прочность и безотказность движения подвижного состава: тез. докл. XI Междунар. конф. – Днепропетровск : ДИИТ, 2004. – С. 150.

86 Путято, А. В. Влияние перетекания жидкости в котле железнодорожной цистерны на ее напряженно-деформированное состояние / А. В. Путято // тез. докл. XVI Междунар. конф. молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения. – М. : ИМАШ РАН, 2004. – С. 145.

87 Шимановский, А. О. Нагруженность котла железнодорожной цистерны при различных свойствах перевозимой жидкости / А. О. Шимановский, А. В. Путято // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: тез. 65 Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск : ДИИТ, 2005. – С. 11–12.

88 Шимановский, А. О. Колебания цистерны с жидкостью при переходных режимах движения / А. О. Шимановский, А. В. Путято // Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. Т. 2. – Киев : Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2005. – С. 383–384.

89 Сенько, В. И. Оценка нагруженности кузова полувагона сыпучим грузом при ударном взаимодействии вагонов / В. И. Сенько, А. В. Путято // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: тез. докл. V Междунар. научн.-техн. конф. – СПб. : ПГУПС, 2007. – С. 139–141.

90 Сенько, В. И. Комплекс технических решений по повышению надежности элементов конструкций вагонов-цистерн для наливных грузов / В. И. Сенько, И. Л. Чернин, А. В. Путято // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: тез. докл. V Междунар. науч.-техн. конф. – СПб. : ПГУПС, 2007. – С. 144–146.

91 Путято, А. В. Компьютерное моделирование гидродинамической нагруженности области люка-лаза вагона-цистерны / А. В. Путято // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. VII Междунар. научн.-техн. конф. – Гомель : УО «ГГТУ им. П. О. Сухого», 2008. – С. 24–25.

92 Путято, А. В. К вопросу силового нагружения при расчетах кузовов вагонов, транспортирующих сыпучие и навалочные грузы / А. В. Путято, В. В. Белогуб // Проблемы механики железнодорожного транспорта: безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава, энергосбережение: тез. докл. XII Междунар. конф. – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2008. – С. 129.

93 Путято, А. В. Моделирование нагруженности элементов конструкции цистерн / А. В. Путято, А. О. Шимановский // Проблемы механики железнодорожного транспорта: безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава, энергосбережение: тез. докл. XII Междунар. конф. – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2008. – С. 130.

94 К вопросу пополнения рабочего парка платформ для перевозки лесных грузов / В. И. Сенько, И. Л. Чернин, А. В. Путято, А. В. Пигунов // Проблемы механики железнодорожного транспорта: безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава, энергосбережение: тез. докл. XII Междунар. конф. – Днепропетровск: ДНУЖТ, 2008. – С. 142.

95 Путято, А. В. Прочность котла цистерны при соударении вагонов с учетом взаимодействия с перевозимым грузом / А. В. Путято // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: тез. докл. VI Междунар. научн.-техн. конф. – СПб. : ПГУПС, 2009. – С. 146–148.

96 Путято, А. В. Решение задачи прочности транспортного резервуара с учетом взаимодействия с перевозимым жидким грузом методом конечных элементов / А. В. Путято // Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов: тез. докл. XXIII Междунар. конф. – СПб, 2009. – С. 147–148.

97 Якубович, О. И. Моделирование упруго-пластического деформирования листового металла при холодной штамповке / О. И. Якубович, А. О. Шимановский, А. В. Путято // Прочность материалов и элементов конструкций: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. Т. 2. – Киев : Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2010. – С. 212–213.

98 Путято, А. В. Моделирование прочности кузова вагона-цистерны при ударном нагружении с учетом нарушения крепления котла к раме / А. В. Путято // Прочность материалов и элементов конструкций: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. Т. 2. – Киев : Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2010. – С. 68–69.

99 Путято, А. В. Моделирование динамики железнодорожного вагона-цистерны с жидкостью / А. В. Путято // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: тез. 71 Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск : ДИИТ, 2011 – С. 33–35.

Патенты

100 Крепление котла на раме вагона-цистерны: пат. 2429 Республика Беларусь, МПК (2006) B 61D 5/00 / В. И. Сенько, А. В. Путято; заявитель и патентообладатель УО «Белорус. гос. ун-т трансп.». – № u 20050013; заявл.

13.01.2005; опубл. 28.02.2006, // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 1(48). – С. 180.

101 Сливной прибор вагона-цистерны: пат. 2615 Республика Беларусь, МПК (2006) B 61D 5/00, 17/00, B 65D 47/00 / В. И. Сенько, И. Л. Чернин, А. В. Пигунов, А. В. Путято, В. В. Белогуб; заявитель и патентообладатель УО «Белорус. гос. ун-т трансп.». – № u 20050567; заявл. 27.09.2005; опубл. 30.04.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 2(49). – С. 172.

102 Сливной прибор железнодорожной цистерны: пат. 2970 Республика Беларусь, МПК (2006) B 61D 5/00, B 65D 47/00 / В. И. Сенько, И. Л. Чернин, А. В. Пигунов, А. В. Путято, В. В. Белогуб; заявитель и патентообладатель УО «Белорус. гос. ун-т трансп.». – № u 20060074; заявл. 13.02.2006; опубл. 30.08.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 4(51). – С. 166–167.

103 Устройство для предохранения от скручивания стяжного хомута: пат. 3011 Республика Беларусь, МПК (2006) B 61D 5/06 / И. Л. Чернин, А. В. Путято, А. В. Пигунов; заявитель и патентообладатель УО «Белорус. гос. ун-т трансп.». – № u 20060150; заявл. 06.03.2006; опубл. 30.08.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 4(51). – С. 167.

104 Устройство для слива нефтепродуктов из железнодорожной цистерны: пат. 3286 Республика Беларусь, МПК (2007) B 61D 5/00, B 65D 47/00 / В. И. Сенько, И. Л. Чернин, А. В. Путято, А. В. Пигунов, В. В. Свириденко; заявитель и патентообладатель УО «Белорус. гос. ун-т трансп.». – № u 20060297; заявл. 12.05.2006; опубл. 28.02.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 1(54). – С. 166.

105 Стена торцевая кузова полувагона: пат. 3566 Республика Беларусь, МПК (2007) B 61D 3/00, B 61D 17/00 / В. И. Сенько, И. Л. Чернин, А. В. Путято, А. В. Пигунов; заявитель и патентообладатель УО «Белорус. гос. ун-т трансп.». – № u 20070756; заявл. 13.11.2006; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3(56). – С. 191.

106 Крепление листовой подшивки крыши кузова вагона: пат. 4008 Республика Беларусь, МПК (2007) B 61D 3/00, B 61D 17/00 / В. И. Сенько, И. Л. Чернин, А. В. Путято, А. В. Пигунов, В. В. Свириденко; заявитель и патентообладатель УО «Белорус. гос. ун-т трансп.». – № u 20070365; заявл. 11.05.2007; опубл. 30.10.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 5(58). – С. 186–187.

107 Устройство наливного люка котла вагона-цистерны: пат. 5795 Республика Беларусь, МПК (2007) B 61D 5/00, B 61D 47/00 / А. В. Путято, В. В. Белогуб, О. В. Путято; заявитель и патентообладатель УО «Белорус. гос. ун-т трансп.». – № u 20090451; заявл. 02.06.2009; опубл. 30.12.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 6(71). – С. 177.

108 Котел железнодорожной цистерны: пат. 6056 Республика Беларусь, МПК (2009) B 61D 5/00 / А. В. Путято, А. О. Шимановский; заявитель и патентообладатель УО «Белорус. гос. ун-т трансп.». – № u 20090741; заявл. 08.09.2009; опубл. 28.02.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 1. – С. 172.

РЭЗЮМЭ

Пуцята Артур Уладзіміравіч

Метадалогія распрацоукі канструкцый вагонаў з улікам сілавога ўзаемадзеяння з грузамі, якія перавозяцца

Ключавыя словы: грузавыя вагоны, груз, узаемадзеянне, мадэляванне, метад канчатковых элементаў, сістэма цвёрдых целаў, трываласць, новыя канструкцыі.

Мэта даследавання: стварэнне метадалогіі распрацоўкі канструкцый вагонаў, заснаванай на вызначэнні іх напружана-дэфармаванага стану з улікам механічных узаемадзеянняў у сістэмах "вагон – рухомы груз" ("вагон – груз без тары", "вагон – сыпкі груз", "вагон – наліўны груз").

Метады даследавання: метады матэматычнага мадэлявання ў часткі распрацоўкі і рэалізацыі кампутарных мадэляў рухомага састава і грузу, а таксама метад электратэнзаметрыі ў часткі эксперыментальных даследаванняў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: Прапанавана метадалогія распрацоўкі канструкцый вагонаў, заснаваная на аналізе назапашанай інфармацыі пра тэхнічны стан вагонаў пасля працяглай эксплуатацыі, а таксама ўліку сілавога ўзаемадзеяння кузаваў вагонаў з грузамі, якія перавозяцца пры выкананні іх трывальных разлікаў, якая ўяўляе сабой аснову для распрацоўкі тэхнічных рашэнняў грузавога рухомага састава. Прапанаваны метады трывальных разлікаў кузаваў вагонаў, якія забяспечваюць комплексны ўлік рэальных дынамічных нагрузак, што ўзнікаюць з прычыны адноснага перасоўвання грузу, пры кампутарным мадэляванні сілавых узаемадзеянняў у сістэмах "вагон – рухомы груз" ("вагон – груз без тары", "вагон – сыпкі груз", "вагон – наліўны груз"). Іх рэалізацыя дазволіла вызначыць напружана-дэфармаваны стан кузаваў вагонаў з улікам сілавога узаемадзеяння з грузамі, якія перавозяцца пры змене ступені запаўнення кузава рознымі па родзе грузамі, а таксама рэальнага тэхнічнага стану металаканструкцыі вагона.

Ступень выкарыстання і рэкамендацыі: Вынікі працы знайшлі ўжыванне на ААТ "Беларускі аўтамабільны завод", СЗАТ "Магілёўскі вагонабудаўнічы завод", СЗАТ "Асіповіцкі вагонабудаўнічы завод" і Андіжанскім механічным заводзе УП "Узжелдорреммаш" Дзяржаўна-акцыянернай чыгуначнай кампаніі "Узбекистон темир йуллари" пры праектаванні і вырабе новых мадэляў чыгуначных вагонаў; на Беларускай чыгунцы пры рэалізацыі праекта па пераабсталяванню незапатрабаваных бункерных вагонаў для перавозкі бітуму ў вагоны-платформы для перавозкі лясных грузаў. Гадавы эканамічны эфект ад пераабсталявання 157 вагонаў па стане на 2009 г. склаў больш за 2 млрд руб.; у навучальным працэсе УА "БелДУТ" пры падрыхтоўцы інжынераў-механікаў па спецыяльнасці "Рухомы састаў". Вынікі дысертацыі карысныя для вагонабудаўнічых і вагонарамонтных прадпрыемстваў.

Вобласць ужывання: машынабудаванне, вагонарамонтныя і вагонабудаўнічыя прадпрыемствы.

РЕЗЮМЕ

Путято Артур Владимирович

Методология разработки конструкций вагонов с учетом силового взаимодействия с перевозимыми грузами

Ключевые слова: грузовые вагоны, перевозимый груз, взаимодействие, моделирование, метод конечных элементов, система твердых тел, прочность, новые конструкции.

Цель исследования: создание методологии разработки конструкций вагонов, основанной на определении их напряженно-деформированного состояния с учетом механических взаимодействий в системах «вагон – подвижный груз» («вагон – навалочный груз», «вагон – сыпучий груз», «вагон – наливной груз»).

Методы исследования: методы математического моделирования в части разработки и реализации компьютерных моделей подвижного состава и груза, а также метод электротензометрии в части экспериментальных исследований.

Полученные результаты и их новизна: Предложена методология разработки конструкций вагонов, основанная на анализе накопленной информации о техническом состоянии металлоконструкции вагонов после длительной эксплуатации, а также учете силового взаимодействия кузовов с перевозимыми грузами при выполнении прочностных расчетов, которая представляет собой основу для разработки технических решений грузового подвижного состава. Разработаны методы прочностных расчетов кузовов вагонов, обеспечивающие комплексный учет реальных динамических нагрузок, возникающих вследствие относительного перемещения груза, при компьютерном моделировании силовых взаимодействий в системах «вагон – подвижный груз» («вагон – навалочный груз», «вагон – сыпучий груз», «вагон – наливной груз»). Их реализация позволила определить напряженно-деформированное состояние кузовов вагонов с учетом силового взаимодействия с перевозимыми грузами при изменении степени заполнения кузова различными по роду грузами, а также реального технического состояния металлоконструкции вагона.

Степень использования и рекомендации: Результаты работы нашли применение на ОАО «Белорусский автомобильный завод», СЗАО «Могилевский вагоностроительный завод», СЗАО «Осиповичский вагоностроительный завод» и Андижанском механическом заводе УП «Узжелдорреммаш» Государственно-акционерной железнодорожной компании «Узбекистон темир йуллари» при проектировании и изготовлении новых моделей железнодорожных вагонов; на Белорусской железной дороге при реализации проекта по переоборудованию невостребованных бункерных вагонов для перевозки битума в вагоны-платформы для перевозки лесных грузов. Годовой экономический эффект от переоборудования 157 вагонов по состоянию на 2009 г. составил более 2 млрд руб.; в учебном процессе УО «БелГУТ» при подготовке инженеров-механиков по специальности «Подвижной состав». Результаты диссертации полезны для вагоностроительных и вагоноремонтных предприятий.

Область применения: машиностроение, вагоноремонтные и вагоностроительные предприятия.

SUMMARY

Putsiata Artur Uladzimiravich

Methodology of development of constructions of cars taking into account power interaction with transported cargoes

Keywords: the goods' cars, transported cargoes, interaction, modelling, a finite-element method, system of solid bodies, the strength, new constructions.

Research objective: creation of methodology of development of constructions of the cars, grounded on determination of their is intense-deformed condition taking into account mechanic interactions in systems «the cars – mobile cargo» («cars – bulk cargo», «the cars – loose cargo», «the cars – fluid cargo»).

Research methods: methods of mathematical modelling in the development and realisation of computer models of a railway vehicles and cargo, and also a tensometry method in the experimental researches.

The received results and their novelty: the methodology of development of the constructions of the cars, grounded on the analysis of the accumulated information of technical condition of the cars after using them for a long time, and also accounting of power interaction of bodies of cars with transported cargoes. This methodology represents the basis for the development of technical solutions of freight railway vehicles. Methods of strength calculations of bodies of the cars, ensuring complex accounting of the real dynamic loads, which arise owing to a relative cargo motion are offered, at a computer simulation of power interactions in systems «the cars – mobile cargo» («cars – bulk cargo», «the cars – loose cargo», «the cars – fluid cargo»). Their realisation allowed to determine the intense-deformed condition of bodies of the cars taking into account power interactions with transported cargoes at change of level of filling of a body by various of cargoes, and also real technical condition of the metallic constructions the car.

Usage and advisory degree: Results of the work found application on Open joint-stock company «Belarus automobile factory», The joint closed joint-stock company «The Mogilyov car-building factory», The joint closed joint-stock company «Osipovichsky car-building factory» and the Andizhan mechanic factory The unitary enterprise "Uzjeldorremmash" of state-joint-stock rail carrier «Uzbekiston темир йуллари» at designing and production of new models of rail cars; on the Belarusian railway in realisation of the project of remodelling of unclaimed bunker cars for bitumen transportation in flatcars for a carriage of timber deck cargoes. Annual economic benefit of remodelling of 157 cars in 2009 constituted more than 2 billion rbl.; in educational process of BelSUT at preparing of mechanical engineers on a speciality "Railway vehicles". Results of the work are useful to the car-building and car-repair enterprises.

Field of application: mechanical engineering, the car-repair and car-building enterprises.

Научное издание

ПУТЯТО Артур Владимирович

Методология разработки конструкций вагонов с учетом силового взаимодействия с перевозимыми грузами

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Подписано в печать 22.03.2012 г. Формат бумаги 60x84 1/16
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 2,73. Тираж 100 экз. Зак. 984.

Типография УО «БелГУТ», 246022, г. Гомель, ул. Кирова, 34.
ЛП № 02330/0494150 от 03.04.2009 г.