

629.4.023.14

П 32

Белорусский государственный университет транспорта

УДК 629.4.023.14

Пигунов Анатолий Владимирович

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ И ОСТАТОЧНОЙ НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ КУЗОВОВ
ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и
электрификация

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Гомель - 2002

Работа выполнена в Белорусском государственном университете транспорта

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор
Сенько В. И., Белорусский
государственный университет
транспорта, ректор

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Хохлов А. А., отраслевой центр
подготовки научно-педагогических
и научных кадров, руководитель

кандидат технических наук, доцент
Ольшевский А. А., Брянский
государственный технический
университет, кафедра «Динамика и
прочность машин»

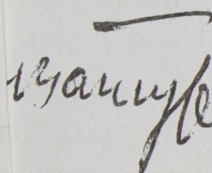
Оппонирующая организация –

**Украинская государственная академия
железнодорожного транспорта**

2002 г. в 12⁰⁰ на заседании совета по
при Белорусском государственном
дресу: 246053, г. Гомель, ул. Кирова,

тся в библиотеке Белорусского
ота

2002 г.



Р.К. Гизатуллин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. За последние 10 лет наблюдается тенденция старения пассажирского вагонного парка Республики Беларусь. На сегодняшний день более трети парка пассажирских вагонов имеют возраст более 20 лет и нуждаются в замене или восстановлении. Особенно острая ситуация сложилась с вагонами ЦМВО, которые составляют основную долю парка пассажирских вагонов Республики Беларусь. Если в 1991 г. их средний возраст составлял 12,7 лет, то в 2000 г. – 18,1 года. Положение осложняется отсутствием достаточного количества валютных средств на закупку новых вагонов, что не позволяет производить обновление вагонного парка.

В сложившейся ситуации весьма актуальной представляется проблема обеспечения работоспособности и поддержания надежного технического состояния существующего вагонного парка через проведение восстановительных ремонтов, в том числе с модернизацией и продлением срока службы. То есть центр тяжести по решению этих вопросов в настоящее время смещается на качество ремонтных мероприятий.

В изменившихся экономических и эксплуатационных условиях, а также при наличии значительного различия в техническом состоянии вагонов одного и того срока эксплуатации существующую систему планово-предупредительных ремонтов нельзя признать достаточно эффективной. Следует искать новые подходы для решения проблемы восстановления технического ресурса пассажирских вагонов. Необходимо изменять систему жизнеобеспечения вагона за счет перехода к системе ремонта, ориентированной на каждый конкретный вагон в зависимости от его технического состояния. Индивидуальными должны быть и сроки постановки вагонов в ремонт и методы их восстановления, т. е. система ремонта должна быть функцией их технического состояния.

Концепция индивидуального подхода к ремонту вагона предполагает проработку и обоснование большого комплекса взаимосвязанных вопросов и, прежде всего, необходимость оценки их технического состояния и остаточной несущей способности.

Данная работа посвящена решению этих вопросов конкретно для кузовов пассажирских вагонов.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа выполнялась в соответствии с планами НИОКР Белорусской железной дороги и Совета по железнодорожному транспорту СНГ (темы «Разработка системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов и путей ее реализации в условиях Республика Беларусь» № ГР 19962268, 1996 - 1998 гг.; «Диагностика и оценка несущей способности пассажирских вагонов по физическому состоянию, 1998 г.; «Оценка технического состояния кузовов пассажирских вагонов постройки ТВЗ и их несущей способности при коррозионном износе через 30 лет эксплуатации», 1998 г.).

Выполненная работа увязана также с Комплексной программой реорганизации и развития локомотиво- и вагоностроения, организации ремонта и эксплуатации пассажирского и грузового подвижного состава Российской Федерации на период 2001-2010 гг.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка системы комплексной оценки технического состояния и остаточной несущей способности кузовов пассажирских вагонов, поступающих в ремонт на вагоноремонтные предприятия.

В диссертационной работе для достижения указанной цели ставились следующие основные задачи:

1. Разработать специальную методику для оценки технического состояния металлоконструкции кузовов пассажирских вагонов, ориентированную на применение современных средств диагностики и ПЭВМ.

2. Создать расчетные модели кузовов основных типов пассажирских вагонов, позволяющих оценивать с помощью метода конечных элементов их остаточную несущую способность.

3. Исследовать влияние степени коррозионных повреждений на остаточную несущую способность элементов кузова.

4. Обосновать предельные толщины основных несущих элементов металлоконструкции кузова пассажирского вагона.

Решение указанных задач позволит дать обоснованные рекомендации по восстановлению заданного уровня несущей способности кузова.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является кузов пассажирского вагона, предметом – техническое и напряженное состояния металлоконструкции кузова за период его жизненного цикла.

Методология и методы проведенного исследования. Для решения поставленных задач использовались современные методы строительной механики, теории вероятностей и математической статистики. В качестве основного метода исследования в диссертации принят метод конечных элементов. При проведении исследований использовались также результаты обследования технического состояния пассажирских вагонов, выполненные БелГУТом и другими организациями.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Научная новизна результатов исследований заключается в следующем:

- разработана методика выборочного обследования технического состояния металлоконструкции кузовов пассажирских вагонов;
- созданы расчетные конечно-элементные модели для оценки остаточной несущей способности кузовов основных типов пассажирских вагонов (некупейного, купейного и прицепного вагона дизель-поезда);
- предложен дифференцированный критерий оценки предельного состояния элементов металлоконструкции кузова;
- разработана модель прогнозирования остаточной несущей

способности металлоконструкции кузовов, имеющих коррозионный износ, на любой заданный год эксплуатации в течение всего жизненного цикла вагона;

- установлены предельные значения толщин сечений элементов кузова, при которых теряется их несущая способность.

Практическая значимость полученных результатов. В диссертации разработаны основные положения системы комплексной оценки технического состояния и остаточной несущей способности кузовов пассажирских вагонов, необходимые для реализации концепции индивидуального подхода к их ремонту с обеспечением заданного уровня восстановления (полного или частичного) несущей способности основных элементов.

Предложенные расчетные модели и методики прошли апробацию на Гомельском и Минском ВРЗ. Они позволяют оценить остаточную несущую способность и остаточный ресурс элементов кузова любого вагона, поступающего в ремонт, и дать рекомендации по рациональному варианту его восстановления.

Результаты выполненных исследований использованы при подготовке Руководящего документа Республики Беларусь «Инструкция по обследованию технического состояния пассажирских вагонов», утвержденного в январе 1999 г. первым заместителем начальника Белорусской ж. д.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Методика выборочного обследования технического состояния металлоконструкции кузовов пассажирских вагонов, ориентированная на применение ПЭВМ и современных средств диагностики.

2. Расчетные конечно-элементные модели кузовов основных типов пассажирских вагонов, позволяющие с помощью метода конечных элементов оценить остаточную несущую способность элементов металлоконструкции по условиям прочности и устойчивости.

3. Модель прогнозирования на ПЭВМ остаточной несущей способности кузовов пассажирских вагонов и управления восстановлением их ресурса за период жизненного цикла вагона.

4. Результаты обоснования предельных значений толщин сечений основных элементов кузова, полученных в процессе исследования влияния степени коррозионных повреждений на несущую способность кузовов.

Личный вклад соискателя. Методика выборочного обследования технического состояния разработана коллективом сотрудников лаборатории «Технические и технологические оценки ресурса единиц подвижного состава» (ТТОРЕПС) БелГУТа при участии автора под руководством д.т.н., профессора В.И. Сенько. Расчетная конечно-элементная модель кузова пассажирского купейного вагона создана соискателем при участии к.т.н., доцента И.Ф. Пастухова. Остальные научные результаты, выносимые на

защиту, получены лично автором.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертации докладывались на Международном симпозиуме «Трибофатика» (г. Тернополь, 2002 г.), международных научно-практических и научно-технических конференциях «Проблемы безопасности на транспорте» (г. Гомель, 1997 и 2000 гг.), «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, 1998 г.), «Технология ремонта машин, механизмов и оборудования» (г. Алушта, 1999 г.), «Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века» (г. Донецк, 1999 г.), «Актуальные проблемы развития транспортных систем и строительного комплекса» (г. Гомель, 2001 г.), на заседаниях технико-экономического Совета Белорусской железной дороги (2000 и 2002 гг.), кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство БелГУТа (2000 и 2002 гг.) и Совета механического факультета БелГУТа (2000 г.).

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 16 научных работ общим количеством 60 страниц (как в соавторстве, так и без), в том числе 2 статьи в журналах (1 статья без соавторов), 3 статьи в сборниках научных работ, Руководящий документ Республики Беларусь «Инструкция по обследованию технического состояния пассажирских вагонов» и 10 тезисов докладов и выступлений на Международных симпозиуме, научно-технических и научно-практических конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем диссертации составляет 184 страницы, из них на 113 страницах помещены иллюстрации, таблицы и приложения. Список использованных источников включает 101 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дана краткая характеристика научной проблемы и обоснована ее актуальность, изложен достигнутый уровень проработки вопросов по теме диссертации, поставлены цель и задачи исследования.

В работе проведен анализ технического состояния пассажирского вагонного парка Республики Беларусь по результатам обследования 782 вагонов и построены графики изменения среднего возраста пассажирских некупейных и купейных вагонов за период с 1991 по 2000 гг. Анализ этих графиков свидетельствует о том, что парк пассажирских вагонов из года в год стареет. Наиболее характерно это проявляется для некупейных вагонов ЦМВО. Установлены временные регрессионные зависимости, описывающие динамику среднего возраста парка пассажирских вагонов.

В работе показано, что в существующих условиях наиболее эффективной и экономичной будет система ремонта, ориентированная на каждый конкретный вагон в зависимости от его технического состояния.

Основные элементы индивидуального подхода к восстановлению вагонов используются при выполнении капитально-восстановительного ремонта (КВР) вагонов. Вопросами организации КВР занимаются во многих организациях. Заслуживают внимания прежде всего научные разработки ВНИИЖТа, БелГУТа и ДИИТа. Практический опыт применения КВР имеют Воронежский и Днепропетровский ВРЗ. Накоплен определенный опыт на Гомельском и Минском ВРЗ. Среди научных разработок, посвященных организации КВР, следует отметить работы Сенько В.И., Савчука О.М., Пастухова И.Ф., Райкова Г.В., Лаврова А.П., Подлитова Н.И., Романовой Т.А. и других.

Для перехода к системе ремонта «по техническому состоянию» необходимо оценить техническое состояние кузовов вагонов с использованием средств диагностики без их вскрытия, установить с помощью ПЭВМ остаточную несущую способность и остаточный ресурс элементов кузова, а затем уже искать оптимальный вариант восстановления кузова.

Оценкой технического состояния кузовов пассажирских вагонов занимались различные организации и научные коллективы, в том числе ВНИИВ (ныне ГосВНИИВ), ВНИИЖТ, БелИИЖТ (ныне БелГУТ), ДИИТ (ныне ДГТУЖТ), РИИЖТ (ныне РГУПС).

Как установлено многочисленными обследованиями, основной причиной снижения несущей способности и разрушения металлических элементов кузовов пассажирских вагонов является коррозионный износ. Поэтому при оценке технического состояния первоочередное внимание уделялось изучению коррозионных повреждений элементов металлической оболочки кузова.

Разработке расчетных конечно-элементных моделей кузовов пассажирских вагонов и совершенствованию методов их расчета посвящены работы Никольского Е.Н., Кобищанова В.В., Ольшевского А.А., Атрощенко В.А., Кузнецова А.Ю., Бруякина И.В., и других.

В этих работах производится оценка напряженно-деформированного состояния кузова вагона на этапе проектирования. В условиях же эксплуатации в результате коррозионного износа происходит уменьшение сечений элементов кузова, то есть появляется необходимость учета изменения их прочностных свойств.

Среди работ, связанных с оценкой остаточной прочности кузовов пассажирских вагонов, следует отметить исследования ВНИИЖТа, а грузовых вагонов – Лапшина В.Ф. Анализу влияния коррозии поперечных сечений на напряженное состояние кузовов грузовых вагонов посвящены работы Ле Ван Хока и Буравлевой Н.Г.

Рассмотренные модели используются для оценки напряженно-деформированного состояния элементов кузовов. В то же время по нашему мнению необходимо оценивать несущую способность элементов кузова по

условиям не только прочности, но и устойчивости.

Вторая глава посвящена разработке методики выборочного обследования технического состояния металлоконструкции кузовов пассажирских вагонов и анализу коррозионных повреждений кузовов по результатам диагностирования.

Для реализации системы ремонта «по техническому состоянию» необходимо внедрение современных систем диагностирования вагонов, предполагающих наличие не только специальных технических средств, но и специальной методики диагностирования.

Такая методика – методика выборочного обследования технического состояния металлоконструкции кузовов пассажирских вагонов – разработана в диссертации. Она ориентирована на применение современных средств диагностики и предусматривает обработку информации на ПЭВМ.

Методика предполагает визуальное и физическое обследование технического состояния в трех зонах по длине вагона и в нескольких сечениях по настилу пола, стенам и крыше (рис. 1). Такое выделение зон и сечений произведено на основе анализа результатов многочисленных обследований технического состояния пассажирских вагонов за предшествующие годы в Республике Беларусь, Российской Федерации и в Украине. В частности I и III зоны выбраны для контроля вследствие их более высокой повреждаемости в сравнении с другими участками кузова, а II зона – как минимальная выборка, по которой можно судить о техническом состоянии всей оставшейся части кузова.

В предлагаемой методике замеры остаточной толщины элементов кузова производятся с помощью ультразвуковых толщиномеров в контрольных точках, расположенных в выделенных сечениях и зонах. Применение ультразвуковых толщиномеров в качестве средств диагностики позволяет оценивать техническое состояние кузовов, имеющих коррозионные повреждения, без их вскрытия. А это является первым и необходимым условием перехода от планово-предупредительной системы ремонта к ремонту «по техническому состоянию».

Контрольные точки (см. рис. 1) нанесены по сечениям и зонам так, что позволяют по ограниченной выборке замеров распространить информацию на всю генеральную совокупность, т.е. на весь кузов.

Результаты обследования заносятся в разработанные диагностические карты по всем крупным сборочным единицам кузова и затем в виде банка данных в ПЭВМ.

Информация, полученная в результате обследования технического состояния металлоконструкции кузовов пассажирских вагонов по разработанной методике, используется затем для оценки остаточной несущей способности и остаточного ресурса их элементов.

Такая информация необходима также для решения вопросов:

- о техническом состоянии металлоконструкции кузовов;

- о методах восстановления несущей способности металлоконструкции кузовов при поступлении пассажирских вагонов в ремонт на ВРЗ и сроках службы восстановленных вагонов;

- об исключении вагонов из инвентарного парка по техническому состоянию.

В диссертации приведены результаты обследования технического состояния пассажирских вагонов, поступивших в ремонт на Гомельский ВРЗ в период с 1997 г. по настоящее время, и выполнено исследование влияния срока эксплуатации пассажирских вагонов на величину коррозионных повреждений металлоконструкции кузовов.

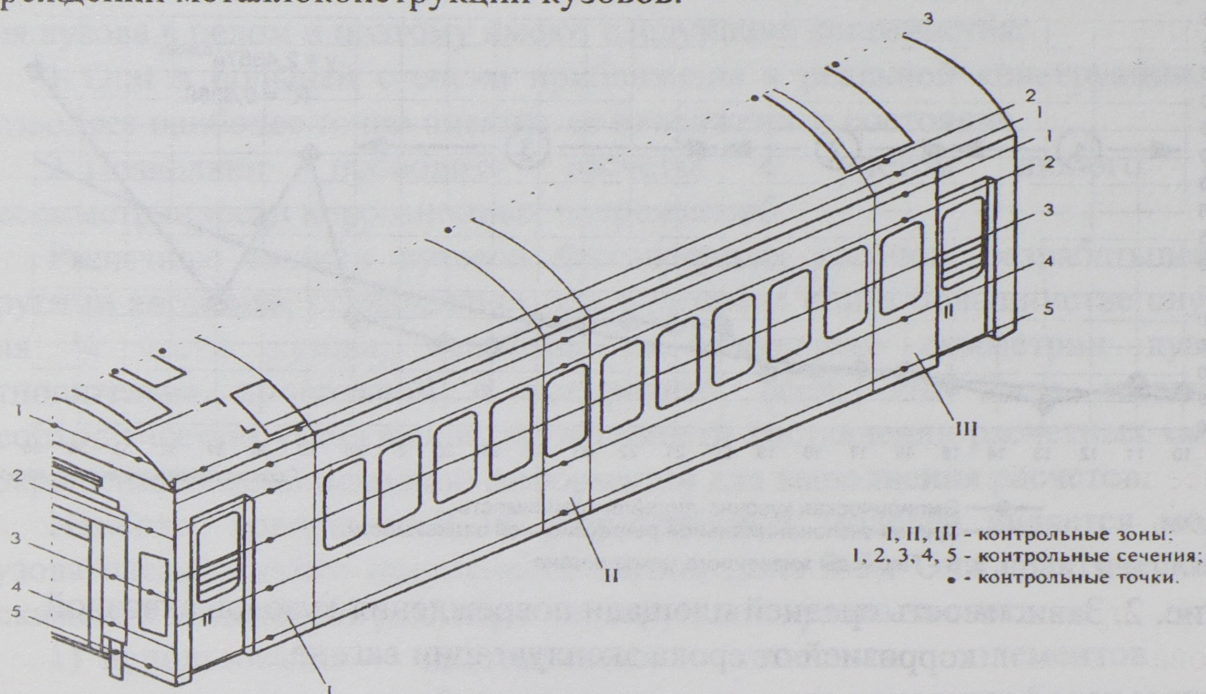


Рис. 1. Схема расположения на кузове пассажирского вагона зон, сечений и контрольных точек для обследования

Для выявления тенденции изменения коррозионных повреждений были построены графики зависимости средней площади сквозных коррозионных повреждений всего кузова, торцовых и боковых стен, а также настила пола от срока эксплуатации.

Анализ графика эмпирической кусочно-линейной зависимости для кузова в целом (рис. 2) показывает, что срок эксплуатации вагона можно условно разбить на три периода: 1) до 15 лет; 2) 15-20 лет; 3) свыше 20 лет. Средняя площадь повреждения сквозной коррозией для каждого из периодов соответственно будет равна примерно 9, 14 и 27 м². После 20 лет эксплуатации идет интенсивное повреждение кузова коррозией, а после 26 лет имеет место резкий скачок ухудшения технического состояния элементов. Практически после этого периода эксплуатации вагон нельзя использовать для перевозки пассажиров без проведения восстановительного ремонта.

Установлены также уравнения регрессии, описывающие зависимости средней площади коррозионных повреждений от срока эксплуатации вагона:

экспоненциальное:

• для кузова в целом – $y = 2,4387e^{0,0857x}$;

• для боковых стен – $y = 1,7033e^{0,0736x}$;

• для настила пола – $y = 0,32e^{0,1147x}$;

степенное – для торцовых стен – $y = 0,0391x^{1,4013}$,

где x – срок эксплуатации вагона, лет; y – средняя площадь коррозионного повреждения, m^2 .



Рис. 2. Зависимость средней площади повреждения кузовов сквозной коррозией от срока эксплуатации вагона

Указанные уравнения представляют собой прогнозные однофакторные модели, которые позволяют оценивать степень повреждения кузова сквозной коррозией в зависимости от срока эксплуатации вагона

Полученная в работе диаграмма рассеяния площади коррозионных повреждений кузовов вагонов свидетельствует о том, что вагоны с одним и тем же сроком эксплуатации существенно различаются своим техническим состоянием, что вызывает трудности в организации их ремонта и свидетельствует о недостаточной эффективности существующей системы восстановления технического ресурса вагонов. Наиболее характерно на диаграмме это проявляется для срока эксплуатации 21 год. Здесь площадь коррозионных повреждений кузова варьируется от 1,87 до 61,11 m^2 . Для этого срока эксплуатации были установлены статистические законы распределения площади коррозионных повреждений для кузова в целом, боковых и торцовых стен, а также настила пола. Полученные законы распределения позволяют установить вероятность попадания в ремонт вагонов с рассматриваемым сроком эксплуатации с заданной степенью повреждения или указать для заданной вероятности степень повреждения кузова вагона.

В третьей главе приведены разработанные расчетные модели для оценки остаточной несущей способности основных типов кузовов пассажирских вагонов, базирующихся на методе конечных элементов. Для составления моделей использовался пакет прикладных программ DPMFEM, разработанный Брянским государственным техническим университетом. Расчетные схемы кузовов принимались в виде комбинированных (пластинчато-стержневых) пространственных систем.

При составлении расчетных моделей использовались 3 вида конечных элементов: пластинчатые 3-х и 4-х угольные и стержневые.

Главной особенностью данных моделей является то, что они построены для кузова в целом и поэтому имеют следующие достоинства:

1. Они в большей степени приближены к реальной конструкции, что позволяет наиболее точно оценить ее напряженное состояние.

2. Позволяют проводить расчеты с учетом любого вида несимметричности коррозионных повреждений.

Расчетные модели кузовов пассажирских вагонов, разрабатываемые другими авторами, составлялись для половины или в большинстве случаев для $\frac{1}{4}$ части кузова, несмотря на отсутствие симметрии кузовов относительно продольной и поперечной осей. Это было связано с необходимостью уменьшения трудоемкости составления расчетных схем и сокращения объема исходной информации для выполнения расчетов.

Наиболее совершенной из разработанных моделей является модель кузова пассажирского некупейного вагона (рис. 3-5). Она практически без искажений моделирует реальную конструкцию кузова за счет:

1) использования пластинчатых конечных элементов для моделирования не только обшивки кузова, но и его основных балок и стоек;

2) моделирования не только гладкой части обшивки, но и гофров, как стержневых подкреплений;

3) применения более густой сетки разбивки кузова на конечные элементы, позволяющей минимизировать отклонения от реальных форм конструкции.

Общее число узлов модели кузова некупейного вагона составило 22112, а число конечных элементов – 33485.

Модель позволяет производить расчеты для любого вида и сочетания эксплуатационных нагрузок с учетом любых схем износов. При расчете рассматривалась схема нагружения, соответствующая I-му расчетному режиму.

Разработанная в диссертационной работе модель кузова пассажирского купейного вагона постройки ГДР (рис. 6) содержит 1827 узлов и 3690 конечных элементов, а модель кузова прицепного вагона дизель-поезда (рис. 7) разбита на 8000 узлов и 11100 конечных элементов. Особенностью конструкции данных вагонов является отсутствие сквозной хребтовой балки. Здесь консольные участки рамы моделировались пластинчатыми

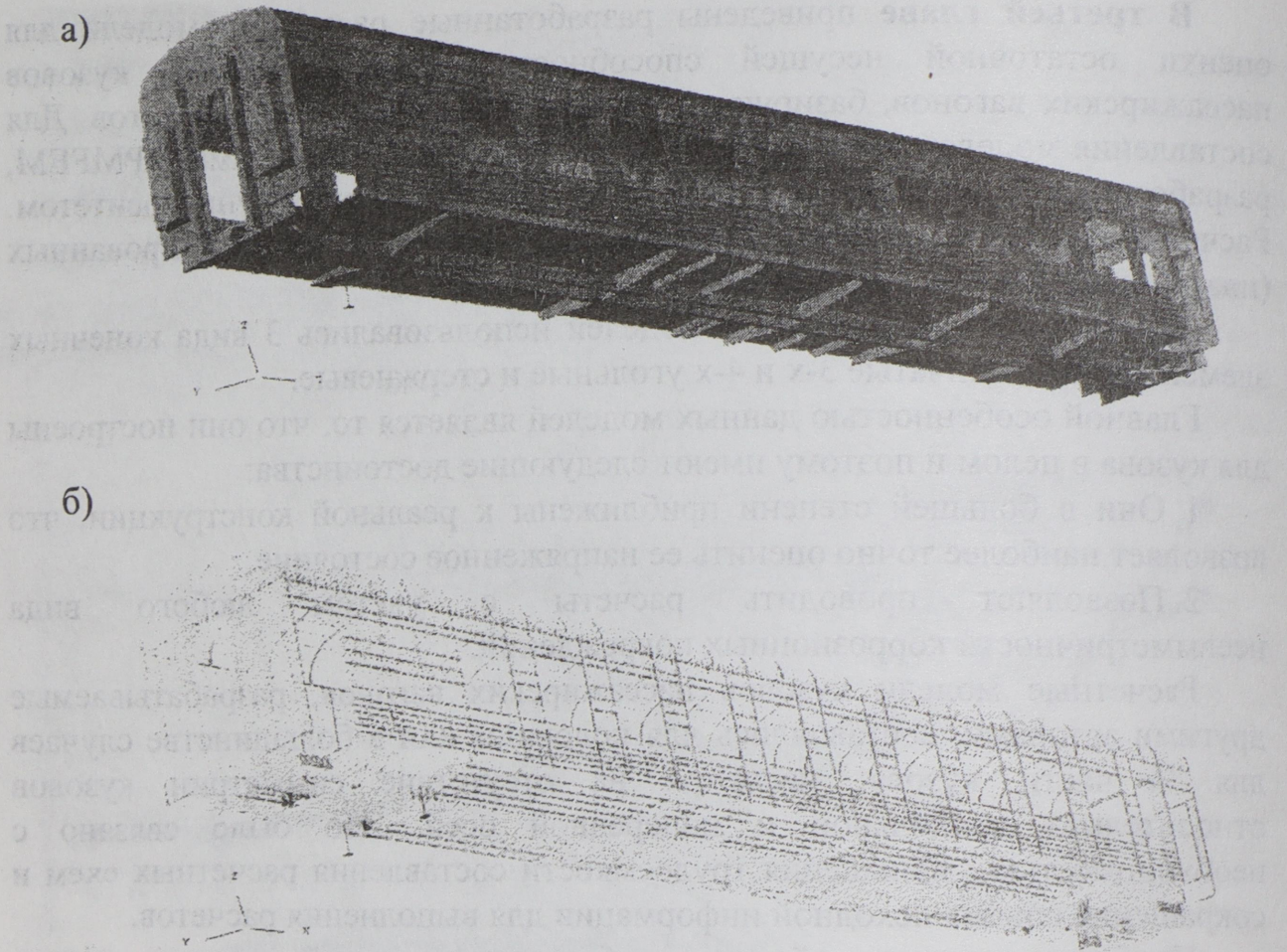


Рис. 3. Расчетная модель кузова пассажирского некупейного вагона:
а – пластинчатая оболочка кузова; б – стержневой каркас

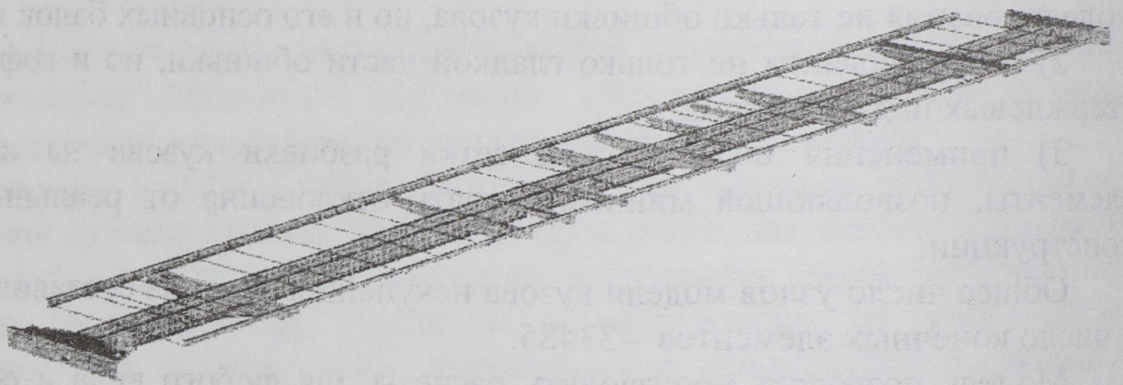


Рис. 4. Общий вид рамы и схема расположения балок набранных пластинами

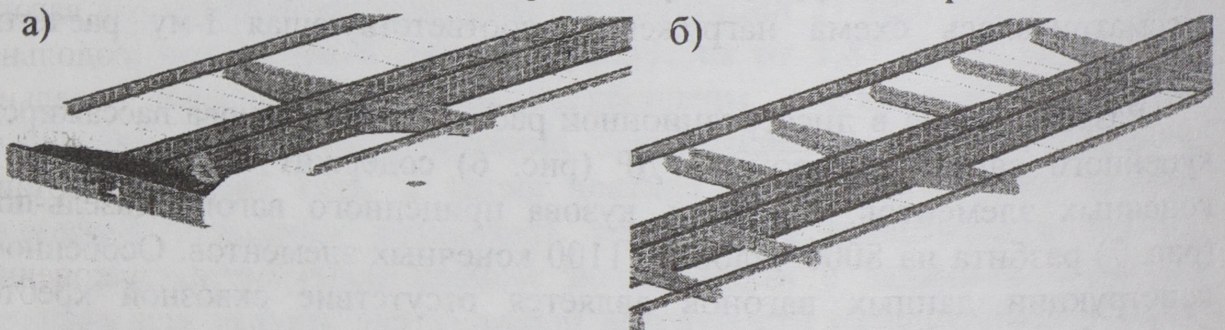


Рис. 5. Фрагменты рамы: а – консольная часть; б – средняя часть

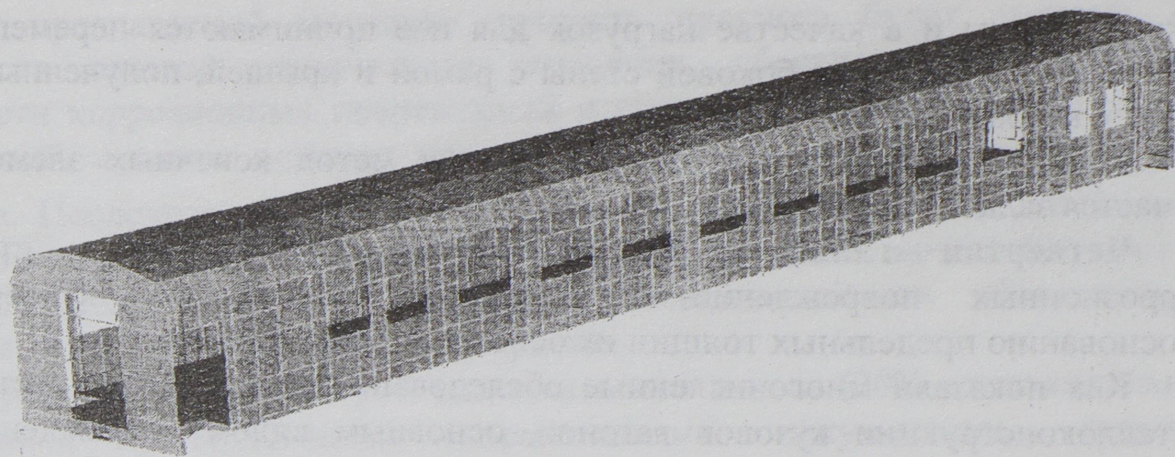


Рис. 6. Расчетная конечно-элементная модель кузова пассажирского купейного вагона

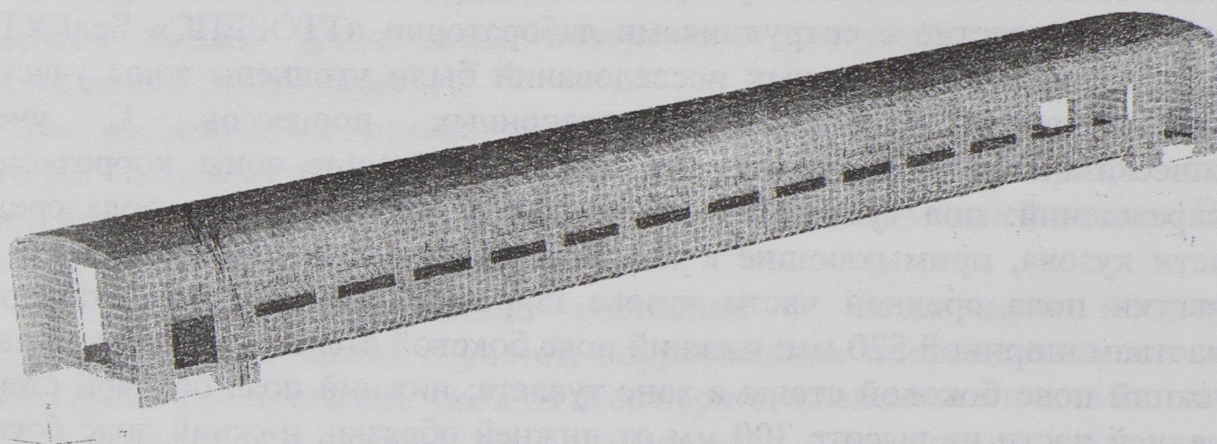


Рис. 7. Расчетная конечно-элементная модель кузова прицепного вагона дизель-поезда

конечными элементами.

Для практической реализации составленных моделей в диссертации разработана программа расчета геометрических характеристик сечений элементов кузова, которые используются в качестве исходных данных для расчета по МКЭ.

Как известно, несущая способность металлоконструкции кузова вагона определяется не только прочностью, но и устойчивостью его продольных элементов и обшивки.

Разработанные расчетные конечно-элементные модели кузовов вагонов позволяют производить оценку устойчивости обшивки и продольных элементов боковых стен, настила пола и крыши, рассматривая не отдельные продольные элементы, а всю их совокупность.

Так, оценка устойчивости боковой стены производится в диссертации по следующему алгоритму.

1. Проводится прочностной расчет кузова в целом методом конечных элементов с помощью разработанной конечно-элементной модели.
2. Из общей конструкции выделяется конечно-элементная модель

боковой стены и в качестве нагрузок для нее принимаются перемещения всех узлов на границах боковой стены с рамой и крышей, полученные при расчете кузова в целом.

3. Для полученной системы, используя метод конечных элементов, решается задача устойчивости.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния степени коррозионных повреждений на несущую способность кузовов и обоснованию предельных толщин их основных элементов.

Как показали многочисленные обследования технического состояния металлоконструкции кузовов вагонов, основным видом повреждения их является коррозия. Процесс коррозии начинается после потери защитных свойств покрытия. При этом на разных участках металлоконструкции кузова процесс коррозии протекает с различной скоростью. В ходе обследования технического состояния кузовов пассажирских вагонов, проведенных автором совместно с сотрудниками лаборатории «ТТОРЕПС» БелГУТа, и анализа ранее выполненных исследований были уточнены зоны участков, различающиеся скоростью коррозионных процессов. С учетом вышесказанного предлагается выделять следующие зоны коррозионных повреждений: пол туалета; пол консольной части; участки пола средней части кузова, примыкающие к боковым балкам рамы на ширине 520 мм; участки пола средней части кузова шириной 600 мм, примыкающие к участкам шириной 520 мм; нижний пояс боковой стены в консольной части; нижний пояс боковой стены в зоне туалета; нижний пояс боковой стены в средней части на высоте 300 мм от нижней обвязки; нижний пояс боковой стены в средней части на высоте более 300 мм от нижней обвязки; торцовая стена в нижней части до угольных ящиков и угольные ящики.

После оценки технического состояния кузовов необходимо оценить остаточный ресурс основных элементов, подверженных коррозионному износу.

В работе для прогнозирования остаточного ресурса элемента металлоконструкции кузова предлагается использовать следующую формулу

$$t_p = \begin{cases} \frac{d_t - d_{\text{пред}}}{V} & \text{при } t > t_{\text{АКП}}; \\ (t_{\text{АКП}} - t) + \frac{d_t - d_{\text{пред}}}{V} & \text{при } t \leq t_{\text{АКП}}, \end{cases}$$

где t_p - остаточный ресурс рассматриваемого элемента кузова, лет; $d_t, d_{\text{пред}}$ - соответственно толщина элемента при сроке эксплуатации вагона t и предельная, мм,

$$d_t = \begin{cases} d_0 & \text{при } t \leq t_{\text{АКП}}; \\ d_0 - (t - t_{\text{АКП}})V & \text{при } t > t_{\text{АКП}}; \end{cases}$$

d_0 - номинальная толщина элемента, мм; V - средняя скорость коррозии элемента, мм/год; $t_{\text{АКП}}$ - срок службы антикоррозионного покрытия, лет.

В предлагаемой методике точность прогноза будет зависеть от точности оценки технического состояния, обоснованности значений скорости коррозионных повреждений и срока службы антикоррозионных покрытий, а также величин предельных износов $d_{\text{пред}}$ элементов кузова вагона. Последняя из указанных величин наиболее значимая, поскольку она практически определяет техническую безопасность вагона. Поэтому в диссертационной работе проведены исследования по обоснованию предельного состояния элементов кузова.

Существующий критерий максимального износа (30% от номинальной толщины), установленный нормативными документами, является одинаковым для всех элементов кузова и не достаточно обоснован, так как элементы кузова имеют различное напряженное состояние и коррозионные процессы на различных участках кузова протекают с разной скоростью.

В работе в качестве критерия наступления предельного состояния элементов кузова принимается потеря ими несущей способности – прочности или устойчивости.

Для исследования влияния степени коррозионных повреждений на несущую способность кузовов в диссертационной работе была разработана модель прогнозирования состояния вагона за период жизненного цикла. Она позволяет:

- моделировать техническое состояние и остаточную несущую способность кузова вагона с учетом коррозионных повреждений, как для любого срока эксплуатации, так и на весь период жизненного цикла вагона;
- определять предельные значения толщины элементов металлоконструкции кузова вагона и их остаточный ресурс;
- учитывать любую последовательность проведения ремонтов, а также устанавливать наиболее оптимальные сроки их проведения;
- управлять восстановлением технического ресурса вагонов.

Модель описывается следующими переменными и параметрами.

ЭНДОГЕННЫЕ (ВЫХОДНЫЕ) ПЕРЕМЕННЫЕ

σ - напряжения в элементах кузова; n_y - расчетные коэффициенты запаса устойчивости элементов кузова; $d_{\text{пред}}$ - предельные толщины элементов кузова; t_p - остаточный ресурс элементов кузова на момент времени t ; n_t - число элементов, потерявших несущую способность на момент времени t .

ПЕРЕМЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ

t - текущий срок эксплуатации вагона.

ЭКЗОГЕННЫЕ (ВХОДНЫЕ) ПЕРЕМЕННЫЕ

J_t - геометрические характеристики сечений элементов для t -го срока эксплуатации.

ПЕРЕМЕННЫЕ УПРАВЛЕНИЯ

d_t - толщина сечения элементов кузова на момент времени t .

ПАРАМЕТРЫ

TKE - типы конечных элементов; NKE - количество конечных элементов; NU - количество узлов; KU - координаты узлов в глобальной системе координат; SW - связи, накладываемые на узлы; NR - характеристика нагружения; $[\sigma]$ - допускаемые напряжения; $[n_y]$ - допускаемый коэффициент запаса устойчивости; T - период моделирования (заданный срок службы вагона); $t_{акп}$ - срок службы антикоррозионного покрытия; $t_{кр}$ - срок проведения капитального ремонта.

В результате проведения вычислительных экспериментов по данной модели имитировалось техническое состояние металлоконструкции кузова для различных сроков эксплуатации и оценивалась остаточная прочность элементов кузова. После проведения прочностного расчета рассчитывались на устойчивость боковые стены и гофры пола, а также нижние обвязки боковых стен.

При достижении элементами кузова предельного состояния по условиям прочности или устойчивости предполагалась замена соответствующих элементов и обновление антикоррозионного покрытия в соответствии с правилами капитального ремонта. Дальнейшие расчеты производились с учетом того, что коррозионные процессы на восстановленном участке приостановлены на срок службы АКП.

Весь процесс исследования был разбит на 12 шагов расчета. Каждый шаг расчета моделировал техническое состояние кузова для определенного срока эксплуатации вагона. По результатам моделирования были получены поля напряжений, характеризующие остаточную прочность элементов кузова. После 5, 8 и 12 шагов расчета, соответствующих 9, 12 и 15 годам эксплуатации вагона, были выявлены элементы кузова, несущая способность которых была потеряна по условиям прочности или устойчивости.

Анализ изменения напряженного состояния по конструктивным группам металлоконструкции кузова в зависимости от степени коррозионного износа позволил сделать важный вывод: в результате уменьшения сечения элементов кузова, происходит перераспределение

между ними напряженного состояния. По одним конструктивным группам наблюдается уменьшение напряженного состояния; по другим они практически не меняются; по третьим уменьшается, а затем увеличивается или – наоборот; по четвертым имеют место скачки напряжений при соблюдении общей тенденции. Для основной массы элементов напряженное состояние увеличивается.

Таким образом, в результате выполненных исследований получены графики, характеризующие изменения напряженного состояния элементов кузова в зависимости от величин их коррозионного износа, и установлены наиболее подверженные коррозионному износу элементы, которые в итоге определяют несущую способность кузова. Их предельный износ находится в диапазоне от 10 до 60%. Полученные результаты подтверждают, что критерий максимального износа нуждается в корректировке и должен быть не унифицированным, а поэлементным дифференцированным по предлагаемым в диссертации условиям прочности и устойчивости.

В заключении работы дана экономическая оценка эффективности перехода к системе ремонта «по техническому состоянию».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В изменившихся экономических и эксплуатационных условиях, а также при наличии значительного различия в техническом состоянии вагонов одного и того же срока службы наиболее эффективной и экономичной будет система ремонта, ориентированная на каждый конкретный вагон в зависимости от его технического состояния.

Концепция индивидуального подхода к ремонту по техническому состоянию базируется на необходимости оценки:

технического состояния вагона с помощью современных диагностических средств;

остаточной несущей способности основных элементов кузова;

остаточного ресурса основных элементов кузова [2, 11, 15].

2. В работе предложена методика выборочного обследования технического состояния кузовов пассажирских вагонов, ориентированная на применение ПЭВМ и современных средств диагностики.

Методика диагностирования предполагает обследование технического состояния кузова в трех зонах по длине вагона и в нескольких сечениях по настилу пола, стенам и крыше. Контрольные точки по сечениям элементов в каждой из зон установлены так, что позволяют по ограниченной выборке замеров оценить общее техническое состояние кузова. Результаты замеров остаточной толщины элементов кузова в контрольных точках заносятся в специально разработанные диагностические карты [1, 8, 12, 13].

Результаты выполненных исследований использованы при подготовке Руководящего документа Республики Беларусь «Инструкции по обследованию технического состояния пассажирских вагонов»,

утвержденной 11 января 1999 г. первым заместителем начальника Белорусской ж. д. Разработанные методики и модели прошли апробацию на Гомельском и Минском ВРЗ [1].

3. Для оценки остаточной несущей способности кузовов пассажирских вагонов разработаны расчетные пространственные комбинированные конечно-элементные модели основных типов вагонов: купейного, некупейного и прицепного вагона дизель-поезда.

Предложенные модели предназначены для оценки остаточной несущей способности кузовов, имеющих коррозионные повреждения. Поэтому они построены для кузова в целом.

Разработанные модели с достаточной точностью аппроксимируют кузов пассажирского вагона рассматриваемого типа и позволяют вести расчеты для любого сочетания эксплуатационных нагрузок и различного технического состояния элементов [2, 4, 5, 6, 7, 9, 10].

4. В диссертационной работе разработана модель прогнозирования технического состояния и остаточной несущей способности металлоконструкции кузовов пассажирских вагонов, имеющих коррозионные износы. Данная модель позволяет смоделировать на ПЭВМ техническое состояние, остаточную несущую способность и остаточный ресурс основных элементов металлоконструкции кузова, как на любой заданный год эксплуатации, так и на период всего жизненного цикла вагона. Разработанная модель может быть использована также для управления восстановлением ресурса вагонов в течение срока службы вагона и исследования степени влияния коррозионных повреждений на несущую способность кузова за любой длительный период времени [3].

5. Выполненные исследования по моделированию на ПЭВМ технического состояния и остаточной несущей способности элементов кузовов пассажирских некупейных вагонов в зависимости от срока эксплуатации позволили установить предельные значения толщин сечений элементов кузова, при которых теряется их несущая способность [3, 4, 14, 16].

6. Произведенные расчеты подтвердили, что существующий критерий максимального износа – потеря конструктивной толщины металла до 30 % – нуждается в корректировке и должен быть дифференцированным для основных элементов кузова по предлагаемым в диссертации условиям прочности и устойчивости. В результате выполненных экспериментов установлены наиболее подверженные коррозионному износу элементы, определяющие несущую способность кузова. Значения их износов варьируются в пределах от 10 до 60% от номинальной толщины [3].

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сенько В.И., Пастухов И.Ф., Свириденко В.В., Белогуб В.В., Сенько Н.Г., Чепцов Д.Е., Кольков В.В., Пигунов А.В. Инструкция по обследованию технического состояния пассажирских вагонов. Руководящий документ Республики Беларусь: ИО 14 БелГУТ 002-99: Утв. Первым заместителем начальника Белорусской ж. д.: Срок действия установлен с 08.07.99 / Белорусская железная дорога. – Минск, 1999. – 25 с.
2. Сенько В.И., Назаренко В.В., Ринг В.И., Пигунов А.В., Свириденко В.В. Стратегия обеспечения перевозочного процесса надежным и комфортабельным подвижным составом // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт / Научно-производственный журнал. – Гомель: БелГУТ, 2001. – № 2. – С. 28–34.
3. Пигунов А.В. Прогнозирование остаточной несущей способности кузовов пассажирских вагонов и управление восстановлением их ресурса // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт / Научно-производственный журнал. – Гомель: БелГУТ, 2002. – № 4 (1). – С. 12–17.
4. Пигунов А.В. Метод конечных элементов в оценке технического состояния вагонов // Сб. студенческих науч. работ / Под ред. В.П. Ярошевича. – Гомель: БелГУТ, 1998. – Вып. 3. – С. 80–83.
5. Сенько В.И., Пастухов И.Ф., Пигунов В.В., Пигунов А.В. К вопросу об оценке остаточной прочности элементов кузовов пассажирских вагонов // Совершенствование конструкции, ремонта, обслуживания подвижного состава железных дорог: Сб. науч. ст. / Под ред. В.И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 1998. – С. 35–39.
6. Пигунов А.В. Автоматизация расчета геометрических характеристик сечений подкрепляющих элементов кузова пассажирского некупейного вагона модели 61-425 // Сб. науч. трудов аспирантов и магистрантов / Под ред. В. П. Ярошевича. – Гомель: БелГУТ, 1999. – Вып. 1. – С. 74–78.
7. Сенько В.И., Пигунов А.В. Об оценке предельного состояния металлоконструкции пассажирского вагона // Трибофатика: Тр. Междунар. симпозиума по трибофатике.: В 2 т. / ТДТУ. – Тернополь, 2002. – Т. 2. – С. 567–570.
8. Сенько В.И., Пастухов И.Ф., Пигунов А.В. Методология оценки остаточного ресурса пассажирских вагонов // Проблемы безопасности на транспорте: Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. / БелГУТ. – Гомель, 1997. – С. 52-53.
9. Пастухов И.Ф., Пигунов А.В. Оценка несущей способности кузовов пассажирских вагонов по физическому состоянию // Актуальные проблемы развития транспортных систем: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. / БелГУТ. – Гомель, 1998. – С. 127-128.
10. Сенько В.И., Пигунов В.В., Пастухов И.Ф., Пигунов А.В. Расчетная модель для оценки остаточной прочности кузовов пассажирских

некупейных вагонов // Современные проблемы машиноведения: Материалы Международ. науч.-практ. конф.: В 2 т. / ГПИ. – Гомель, 1998. – Т. 1. – С. 48-50.

11. Сенько В.И., Пастухов И.Ф., Пигунов А.В. Организация индивидуального подхода к ремонту пассажирских вагонов в условиях вагоноремонтных заводов // Технология ремонта машин, механизмов и оборудования (Ремонт-99): Материалы 7 Международ. конф. / Ассоциация технологов-машиностроителей Украины. – Алушта - Киев, 1999. – С. 121.

12. Сенько В.И., Пастухов И.Ф., Белогуб В.В., Пигунов А.В. Диагностирование – как основа качественного восстановления утраченного технического состояния продукции // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века: Сб. тр. Международ. науч.-техн. конф.: В 3 т. / ДонГТУ. – Донецк, 1999. – Т. 3. – С. 18-20.

13. Пастухов И.Ф., Артеменко К.И., Белогуб В.В., Пигунов А.В. Оценка состояния пассажирских вагонов при исключении из инвентарного парка // Проблемы безопасности на транспорте: Тез. докл. Международ. науч.-практ. конф. / БелГУТ. – Гомель, 2000. – С. 163.

14. Пигунов А.В. К вопросу о методике оценки предельного состояния элементов кузовов вагонов расчетным путем // Проблемы безопасности на транспорте: Тез. докл. Международ. науч.-практ. конф. / БелГУТ. – Гомель, 2000. – С. 165.

15. Кошанов В.М., Свириденко В.В., Пигунов А.В. Характеристика возрастного уровня парка пассажирских вагонов во временном интервале // Проблемы безопасности на транспорте: Тез. докл. Международ. науч.-практ. конф. / БелГУТ. – Гомель, 2000. – С. 67.

16. Пигунов А.В. Методика оценки предельного состояния элементов металлоконструкции кузова пассажирского некупейного вагона // Актуальные проблемы развития транспортных систем и строительного комплекса: Тр. Международ. науч.-практ. конф. / БелГУТ. – Гомель, 2001. – С. 88.

Пигунов Анатолий Владимирович

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОСТАТОЧНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КУЗОВОВ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

Ключевые слова: пассажирский вагон, металлоконструкция кузова, обследование технического состояния, индивидуальный ремонт, коррозионные повреждения, диагностирование, расчетная конечно-элементная модель, метод конечных элементов, вычислительный эксперимент, прогнозирование, остаточная несущая способность, остаточный ресурс, предельное состояние, прочность, устойчивость

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является кузов пассажирского вагона, предметом – техническое и напряженное состояния металлоконструкции кузова за период его жизненного цикла.

Цель работы состоит в разработке системы комплексной оценки технического состояния и остаточной несущей способности кузовов пассажирских вагонов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались современные методы строительной механики, теории вероятностей и математической статистики. В качестве основного метода исследования в диссертации принят метод конечных элементов.

Научная новизна и значимость полученных результатов: разработана методика выборочного обследования технического состояния металлоконструкции кузовов пассажирских вагонов; созданы расчетные конечно-элементные модели для оценки остаточной несущей способности кузовов основных типов пассажирских вагонов; предложен дифференцированный критерий оценки предельного состояния элементов металлоконструкции кузова по условиям прочности и устойчивости; разработана модель прогнозирования остаточной несущей способности металлоконструкции кузовов, имеющих коррозионный износ, на любой заданный год эксплуатации в течение всего жизненного цикла вагона; установлены предельные значения толщины сечений элементов кузова, при которых теряется несущая способность кузова.

Степень использования результатов и область применения. Предложенные расчетные модели и методики апробированы на Гомельском и Минском ВРЗ и могут быть использованы на любом пассажирском вагоноремонтном заводе.

Результаты выполненных исследований применены при подготовке Руководящего документа Республики Беларусь «Инструкция по обследованию технического состояния пассажирских вагонов».

SUMMARY

Anatoly Pigunov

**COMPLEX ESTIMATION TECHNICAL
CONDITION And RESIDUAL BEARING
ABILITIES of BODIES
CARRIAGES**

Key words: the carriage, metallic-construction of a body, inspection of a technical condition, individual repair, corrosion damages, diagnosing, settlement certainly - element model, method of final elements, computing experiment, forecasting, residual bearing ability, residual resource, limiting condition, durability, stability

Object and subject of research. Object of research is the body of the carriage, subject - technical and intense condition metallic-construction of a body for the period of his life cycle.

The purpose of job consists in system engineering of a complex estimation of a technical condition and residual bearing ability of bodies of carriages.

Methods of research. For the decision of the put tasks the modern methods of the building mechanics, theory of probabilities and mathematical statistics were used. As the basic method of research in the dissertation the method of final elements is accepted.

Scientific novelty and importance of the received results: the technique of selective inspection of a technical condition metallic-construction of bodies of carriages is developed; the settlement certainly - element models for an estimation of residual bearing ability of bodies of the basic types of carriages are created; is offered differentiate criterion of an estimation of a limiting condition of elements metallic-construction of a body on conditions of durability and stability; the model of forecasting of residual bearing ability metallic-construction of bodies having corrosion deterioration, for any given year of operation during all life cycle of the car is developed; the limiting meanings of thickness of sections of elements of a body are established, at which the bearing ability of a body is lost.

Degree of use of results and area of application. The offered settlement models and techniques factory repairing cars on Gomel and Minsk also can be used on any a factory repairing passenger cars.

The results of the executed researches are applied by preparation of the Managing document of Republic Belarus " The Instruction on inspection of a technical condition of carriages ".

Пігуноў Анатоля Уладзіміравіч

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЭНКА ТЭХНІЧНАГА СТАНУ І КАНЕЧНАЙ ТУВАЛЬНАСЦІ КУЗАВОЎ ЧЫГУНАЧНЫХ ПАСАЖІРСКІХ ВАГОНАЎ

Ключавыя словы: пасажырскі вагон, металаканструкцыя кузава, абследванне тэхнічнага стану, індывідуальны рамонт, каразійныя пашкодванні, дыягнатаванне, разліковая канечне-элементная мадэль, метады канечных элементаў, вылічальны эксперымент, прагнозаванне, астатковая нясукая здольнасць, астатковы рэсурс, гранічны дапушчальны стан, трываласць, устойлівасць.

Аб'ект і прадмет даследвання. Аб'ектам даследвання з'яўляецца кузаў пасажырскага вагона, прадметам – тэхнічны і напружаны стан металаканструкцыі кузава вагона.

Мэтаю работы з'яўляецца распрацоўка сістэмы комплекснай ацэнкі тэхнічнага стану і астатковай нясукай здольнасці кузава пасажырскага вагона.

Метады даследвання. Для вырашэння пастаўленых задач выкарыстоўваліся сучасныя метады будаўнічай механікі, тэорыі імавернасці і матэматычнай статыстыкі. У якасці асноўнага метаду даследвання ў дысертацыі прыняты метады канечных элементаў.

Навуковая навізна і значнасць атрыманых вынікаў: распрацавана метадыка выбарачнага абследвання тэхнічнага стану металаканструкцыі кузава пасажырскага вагона; створаны разліковыя канечне-элементныя мадэлі для ацэнкі астатковай нясукай здольнасці кузавоў асноўных тыпаў пасажырскіх вагонаў; прапанаваны дыферэнцыраваны крытэрыі ацэнкі гранічнага стану элементаў металаканструкцыі кузава па умове трываласці і устойлівасці; распрацавана мадэль прагназавання астатковай нясукай здольнасці металаканструкцыі кузава, які мае каразійны і знос, на любы заданы год эксплуатацыі на працягу усяго жыццёвага цыклу вагона; устаноўлены гранічныя значэнні таўшчыні сячэнняў элементаў кузава, пры якіх губляецца яго нясукая здольнасць.

Ступень і галіна выкарыстання вынікаў. Прапанаваныя разліковыя мадэлі і метадыкі праходзяць апрабацыю на Гомельскім і Мінскім ВРЗ і могуць быць выкарыстаны на кожным пасажырскім вагонарэмонтным заводзе.

Вынікі выкананых даследванняў выкарастаны пры падрыхтоўцы Кіраўнічага дакумента Рэспублікі Беларусь “Інструкцыя па абследванні тэхнічнага стану пасажырскіх вагонаў”.

Гомельскі ўніверсітэт імя Янкі Смолы

ІНСТІТУТ АГРОНАМАЎ І РАСЛІН
І НАСІЛЬНІХ ЖЫВЦЯЎ
ДЭПАРТАМЕНТ
НАУКАЎ

Даная праца прызначана для вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары. Яна ўключае ў сябе асноўныя аспекты вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары. Яна ўключае ў сябе асноўныя аспекты вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары.

Гэты праца прызначана для вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары. Яна ўключае ў сябе асноўныя аспекты вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары.

Гэты праца прызначана для вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары. Яна ўключае ў сябе асноўныя аспекты вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары.

Гэты праца прызначана для вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары. Яна ўключае ў сябе асноўныя аспекты вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары.

Гэты праца прызначана для вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары. Яна ўключае ў сябе асноўныя аспекты вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары.

Гэты праца прызначана для вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары. Яна ўключае ў сябе асноўныя аспекты вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары.

Гэты праца прызначана для вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары. Яна ўключае ў сябе асноўныя аспекты вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары.

Гэты праца прызначана для вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары. Яна ўключае ў сябе асноўныя аспекты вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары.

Гэты праца прызначана для вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары. Яна ўключае ў сябе асноўныя аспекты вывучэння і выкарыстання ў сельскагаспадарчым сектары.

Подписано в печать 16.11.2002 г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1,5. Тираж 100. Зак. 1977.

Типография БелГУТа, 246022, г. Гомель, ул. Кирова, 34.
Лицензия ЛП № 360 от 26.07.99 г.