

На правах рукописи



Лукашова Елена Витальевна

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ
ЖЕСТКОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ КУЗОВОВ
ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Брянск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Антипин Дмитрий Яковлевич

Официальные оппоненты: **Беспалько Сергей Валерьевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ))

Самошкин Олег Сергеевич
кандидат технических наук, заместитель
начальника Управления технической политики
и транспортного обеспечения – начальник
производственно-технического отдела
Акционерного общества «Федеральная
пассажирская компания» (АО «ФПК»)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС), г. Екатеринбург.

Защита состоится «24» декабря 2024 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета 99.0.149.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» по адресу: Россия, 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10-Б, учебный корпус № 4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» и на сайте <https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/lukashova-elena-vitalievna>

Автореферат разослан «__»_____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Антипин Дмитрий Яковлевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время отечественный рынок пассажирских перевозок выдвигает повышенные требования к уровню безопасности и комфорта перевозки пассажиров, в том числе железнодорожным подвижным составом.

Уровень комфорта в пассажирском вагоне зависит в значительной степени от жесткостных характеристик кузова, которые в свою очередь определяют его вибрационную нагруженность.

Одним из общепринятых критериев оценки жесткостных характеристик кузова является его первая собственная частота изгибных колебаний. Она может быть определена тремя методами: аналитическим, экспериментальным и на основе математического компьютерного моделирования.

Аналитический метод, обеспечивает приближенную оценку первой собственной частоты изгибных колебаний. Экспериментальные методы позволяют получать более точный результат, но связаны со значительными затратами материальных и временных ресурсов. Метод математического компьютерного моделирования позволяет с достаточной точностью описывать механику колебаний кузова при значительно меньших затратах ресурсов. В его рамках существует возможность учитывать основные особенности устройства конструкции кузова, влияющие на жесткостные характеристики, что подтверждает целесообразность его применения для оценки вибрационной нагруженности кузовов.

Методы оценки вибрационной нагруженности несущих конструкций кузовов вагонов на основе компьютерного моделирования базируются на методе конечных элементов (МКЭ). Традиционно создаваемая конечноэлементная модель представляет собой только несущую конструкцию кузова, в которой вся масса, включающая оборудование, элементы внутренней отделки интерьера, экипировки, а также пассажиров с багажом, равномерно распределена по узлам расчетной схемы. Поэтому влияние распределения сосредоточенных масс в колеблющейся упругой системе учитывается усреднено, что непосредственно сказывается на точности получаемого результата. Исходя из этого актуальной является задача разработки уточненной методики определения первой собственной частоты изгибных колебаний кузова, а также обоснование конструктивных решений, обеспечивающих увеличения изгибной жесткости несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов.

Степень разработанности темы исследования. Известно значительное количество работ российских и зарубежных ученых, которые занимались изучением динамики подвижного состава и его взаимодействия с верхним строением пути, а также увеличения жесткости и прочности кузова. В числе основных теоретических и экспериментальных работ по динамике подвижного состава, необходимо отметить исследования Жуковского Н.Е., являющегося одним из основоположников математического моделирования. Дальнейшее развитие данного направления продолжили известные ученые Блохин Е.П., Манашкин Л.А., Лазарян В.А., Вершинский С.В., Данилов В.Н., Петров Г.И., Хусидов В.Д., Бурчак Г.П., Савоськин А.Н., Ушкалов В.Ф., Волков П.В., Соколов С.И., Грапис О.П., Коган А.Я., Вериго М.Ф., Лапшин В.Ф., Павлюков А.Э., Смолянинов А.В., Котуранов В.Н., Филиппов В.Н., Цвик Л.Б. и другие.

Моделирование динамики подвижного состава на основе математического компьютерного моделирования с использованием прикладного программного

обеспечения отражено в исследованиях Погорелова Д.Ю., Кобищанова В.В., Антипина Д.Я., Михеева Г.В., Юхневского А.А., Скачкова А.Н., Коршунова С.Д., Самошкина С.Л., Самошкина О.Л., Василевского В.В., Гончарова Д.И., Оганьяна Э.С. и других.

Тема оптимизации несущих конструкций кузовов пассажирского подвижного состава на основе математического компьютерного моделирования отражена в работах Гурчинского Р.В., Козлова М.П., Жукова А.С., Ашурковой С.Н., Лебедева В.А., Павлюкова А.Э., Лозбинева В.П., Лозбинева Ф.Ю., Лагутиной А.А., Шинкарука А.С. и других.

Методы математического компьютерного моделирования для оценки комфорта пассажиров использовал в своей работе Митраков А.С.

Исследованиями комфорта пассажиров при движении, в том числе в поездах с принудительным наклоном кузова в кривых, занимался шведский ученый Фёрстберг Й. Среди зарубежных исследователей, занимающихся вопросами комфорта, можно отметить Шандла Г., Люгнера П., Бенацки К., Козека М., Стриберски А. С учетом проведенного анализа мирового и отечественного опыта в области исследования динамических колебаний несущих конструкций вагонов в виде подкрепленных оболочек, оценки влияния изгибной жесткости кузовов на безопасность и комфорт пассажиров были сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Цель и задачи. Целью работы является обоснование технических решений по повышению жесткости несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов на основе уточненного моделирования их динамической нагруженности в эксплуатации. Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1 выполнить обзор существующих несущих систем современных кузовов пассажирских вагонов и критериев оценки их жесткостных характеристик;

2 проанализировать методы исследования первой собственной частоты изгибных колебаний кузова пассажирского вагона;

3 разработать уточнённую методику оценки первой собственной частоты изгибных колебаний кузова с использованием детализированных конечноэлементных моделей;

4 выполнить анализ влияния способа распределения массы кузова вагона по узлам конечноэлементной модели на результаты расчета первой собственной частоты изгибных колебаний;

5 выполнить анализ влияния способа распределения массы кузова вагона по узлам конечноэлементной модели на результаты моделирования движения вагона по неровностям пути;

6 выполнить анализ методов повышения изгибной жесткости несущей конструкции кузова пассажирского вагона;

7 разработать варианты конструктивных решений по повышению изгибной жесткости кузова;

8 на основе многовариантных расчётов выполнить обоснование конструктивного решения, обеспечивающего повышение изгибной жесткости кузова пассажирского вагона;

9 выполнить оценку эффективности полученного конструктивного решения кузова вагона, обладающего повышенной изгибной жесткостью.

Объектом исследования принят отечественный пассажирский вагон нового поколения модели 61-4517 производства ОАО «Тверской вагоностроительный завод».

Предметом исследования являются жесткостные характеристики кузова пассажирского вагона.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1 разработана уточнённая методика оценки первой собственной частоты изгибных колебаний кузова пассажирского вагона;
- 2 созданы детализированные конечноэлементные модели кузова пассажирского вагона с учетом реального расположения тяжеловесного оборудования и элементов внутреннего интерьера салона;
- 3 определено влияния способа распределения массы кузова вагона по узлам конечноэлементной модели на результаты расчета первой собственной частоты изгибных колебаний и моделирования движения вагона по неровностям пути;
- 4 выполнено обоснование конструктивных решений, обеспечивающих повышение изгибной жесткости кузова пассажирского вагона.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- 1 создана уточнённая методика оценки первой собственной частоты изгибных колебаний кузова с использованием детализированных конечноэлементных моделей;
- 2 разработаны детализированные конечноэлементные модели кузова пассажирского вагона, учитывающие реальное расположения тяжеловесного оборудования и элементов внутреннего интерьера салона;
- 3 установлено влияние способа распределения массы кузова вагона по узлам конечноэлементной модели на результаты расчета первой собственной частоты изгибных колебаний и результаты моделирования движения вагона по неровностям пути;
- 4 разработаны варианты конструктивных решений, обеспечивающих повышение изгибной жесткости несущей конструкции кузова;
- 5 в рамках предложенной методики обосновано наиболее рациональное конструктивное решение, обеспечивающее повышение изгибной жесткости кузова пассажирского вагона, на основе многовариантных расчётов;
- 6 методами математического компьютерного моделирования произведена оценка безопасности и эффективности полученного конструктивного решения кузова вагона повышенной жесткости.

Методология и методы исследований. Для оценки напряженного деформированного состояния и собственных частот, и форм колебаний кузова пассажирского вагона использовано конечноэлементное моделирование. Исследование динамических характеристик производилось с применением пространственных гибридных динамических моделей подвижного состава, реализованных в среде модуля UM Loco программного комплекса «Универсальный механизм».

Принятые допущения и ограничения:

- 1 оборудование вагона массой меньше 140 кг равномерно распределяется по узлам соответствующих элементов кузова вагона;
- 2 учет внутреннего трения в несущей конструкции осуществляется в рамках гипотезы Фойгта;
- 3 силы трения между элементами интерьера салона и при их взаимодействии с несущей конструкцией кузова не учитывались;
- 4 вес пассажиров и багажа равномерно распределен по диванам и полкам;
- 5 при моделировании движения вагона по неровностям пути не учитывались продольные усилия, возникающие вследствие взаимодействия вагона с другими единицами в составе поезда.

Положения, выносимые на защиту:

- 1 уточнённая методика оценки первой собственной частоты изгибных колебаний кузова с использованием детализированных конечноэлементных моделей;
- 2 детализированные конечноэлементные модели кузова пассажирского вагона, учитывающие реальное расположение тяжеловесного оборудования и элементов внутреннего интерьера салона, созданные на их основе гибридные динамические модели движения пассажирского вагона по неровностям пути;
- 3 обоснование необходимости учета реального расположения масс тяжеловесного оборудования и элементов внутреннего интерьера при расчете первой собственной частоты изгибных колебаний и исследований динамических характеристик пассажирского вагона методами математического моделирования;
- 4 методы повышения жесткости несущей конструкции кузова пассажирского вагона;
- 5 обоснование конструктивного решения, обеспечивающего повышение жесткости кузова пассажирского вагона, на основе многовариантных расчётов;
- 6 результаты компьютерного моделирования оценки эффективности принятого конструктивного решения кузова вагона повышенной жесткости.

Степень достоверности и апробации работы. Подтверждается корректным использованием методов математического моделирования и удовлетворительной сходимостью результатов расчетов с данными натурных статических, динамических и поездных испытаний.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 10 научно-технических и научно-практических конференциях: IV Международная конференция-конкурс «Новые горизонты» (БГТУ, 2017); 4-я Международная молодежная научно-практической конференция «Прогрессивные технологии и процессы (Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2017); «Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов» (ИМАШ РАН, 2017 г.); 8-я Международная научно-практическая конференция «Перспективное развитие науки, техники и технологий» (Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2018); VI Международная научно-практическая конференция «Новые горизонты» посвященная 90-летию БГТУ (БГТУ, 2019); 3-я Всероссийская научная конференция «Проблемы и перспективы развития России: молодежный взгляд в будущее» (Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2020); VII научно-практическая конференция с международным участием «Новые горизонты» (БГТУ, 2020); 3-я Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике» (Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2021); Научно-техническая конференция «Наука, техника, инновации» (Брянск, 2023); 4-я Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых «Школа молодых новаторов» (Курск, 2023).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы, состоящего из 162 наименований, приложения. Общий объем диссертации составляет 123 страницы машинописного текста, содержит 54 рисунка, 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражены актуальность и степень разработанности темы, поставлены цели и задачи, выбраны методы проведения исследований, изложены научная новизна, основные положения и практическая значимость работы, показаны достоверность результатов и степень апробации.

В первом разделе работы проведен анализ состояния вопроса и степени разработанности проблемы повышения комфорта пассажиров за счет увеличения жесткостных характеристик кузова пассажирского вагона. Проведен обзор существующих типов конструкций кузовов как отечественного, так и зарубежного производства. Установлено, что подавляющее большинство несущих систем пассажирских вагонов являются подкрепленными несущими оболочками. Другим вариантом могут быть оболочки с преимущественно несущей рамой. При этом жесткость обеспечивается с помощью применения различных видов обшивки, подкреплений в виде стрингеров, поперечных перегородок. Также существуют варианты с неплоскими стенами и многослойными обшивками.

На основе обзора результатов исследований отечественных и зарубежных ученых установлены три основных подхода к оценке колебаний пассажирского вагона: экспериментальный с использованием реальной конструкции вагона, аналитический и математическое моделирование с использованием компьютерных технологий. В качестве численных методов для решения динамических задач при моделировании упругих тел наибольшее распространение получил метод конечных элементов.

Второй раздел посвящён разработке уточненной методики определения первой собственной частоты изгибных колебаний кузова, разработке и верификации детализированных конечноэлементных моделей кузова пассажирского вагона, а также установления влияния способа распределения массы кузова вагона по узлам конечноэлементной модели на результаты расчета. Представлено детальное описание объекта исследования.

Анализ существующих критериев жесткостных характеристик кузова пассажирского вагона показал, что наиболее применимым в отечественной и зарубежной практике является первая собственная частота изгибных колебаний.

В качестве инструмента для исследований первой собственной частоты изгибных колебаний кузова использован промышленный программный комплекс, реализующий метод конечных элементов (МКЭ). В его рамках расчет собственных частот и форм колебаний производится на основе способа Ланцоша, сочетающего лучшие свойства методов итераций и приведения.

В качестве объекта исследования предложенной методики принят отечественный пассажирский вагон нового поколения модели 61-4517 производства ОАО «Тверской вагоностроительный завод».

В соответствии с предложенной методикой была разработана конечноэлементная пластинчатая модель исходной конструкции кузова в программном комплексе, реализующем метод конечных элементов. Расчетная пластинчатая модель имеет 242 тыс. элементов с характерным размером 80×80 мм, 139 тыс. узлов, а число степеней свободы составляет более 900 тыс. Далее была произведена ее верификация данными натурных стендовых испытаний, произведенных испытательным центром АО НО «Тверской институт вагоностроения» (АО НО «ТИВ»).

Значения нормальных напряжений по сечению кузова для разных видов нагрузок, полученные как в результате расчетов конечноэлементной модели, так и экспериментальным путем, качественно и количественно близки. В связи с этим можно сделать вывод, что разработанная пластинчатая конечноэлементная

модель может использоваться для дальнейших расчетов жесткостных и прочностных характеристик несущей конструкции кузова пассажирского вагона.

На втором этапе верификации модели сопоставлялись результаты динамических стендовых испытаний для определения первой собственной частоты изгибных колебаний, проведенных также на базе АО НО «ТИВ», и частотой, рассчитанной с использованием разработанной модели. При динамических стендовых испытаниях с участием автора работы были определены необходимые показатели с помощью измерительного усилителя Spider-8 с последующей обработкой на ЭВМ. Все значения регистрировались при плавном и ступенчатом увеличении частоты возмущающего воздействия от 5 до 25 Гц в семи точках кузова, которые располагаются по длине нижней продольной обвязки.

В результате сопоставления результатов динамических стендовых испытаний и данными, полученными с использованием разработанной конечноэлементной модели, разница не превысила 11,9 %.

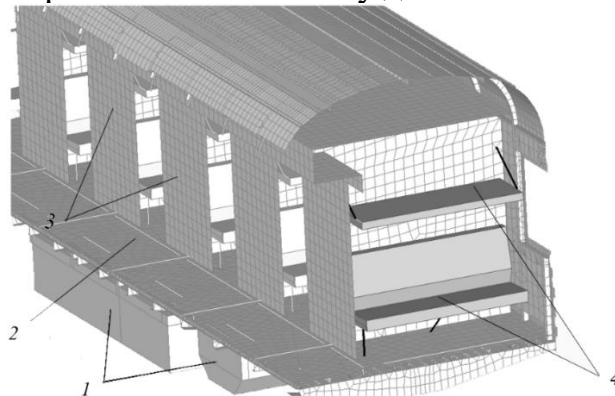
Проведя анализ методов определения первой собственной частоты изгибных колебаний кузовов с использованием конечноэлементной модели было установлено, что традиционно масса вагона равномерно распределяется по всем узлам модели кузова, что дает погрешность в результате расчета. В связи с этим была поставлена задача оценить влияние распределения массы металлоконструкции кузова на значения первой собственной частоты изгибных колебаний. В результате разработано четыре варианта распределения массы кузова вагона по узлам конечноэлементной модели.

Первый вариант представляет собой пластинчатую конечноэлементную модель, описанную ранее. Масса кузова вместе с оборудованием и внутренним интерьером равномерно распределена по всем узлам конечноэлементной модели.

Второй вариант конечноэлементной модели отличается от первого тем, что масса кузова равномерно распределена по основным крупным сборочным единицам кузова, таким как рама, боковые и торцовые стены, крыша. Для каждой из них задается соответствующая масса, которая также учитывает оборудование, размещенное на данном элементе.

Третий вариант в отличие от второго предусматривает создание тяжеловесного оборудования объемными конечными элементами с реальным описанием его инерциальных характеристик и способов крепления на кузове.

Четвертый вариант в отличие от третьего предусматривает описание элементов внутреннего интерьера пассажирского салона конечными элементами, масса багажа и пассажиров включена в массу диванов и полок (рисунок 1).



1 – тяжеловесное оборудование; 2 – пол на упругих элементах; 3 – межкупежные перегородки; 4 – диваны и полки

Рисунок 1 – Составляющие интерьера вагона, смоделированные объемными конечными элементами

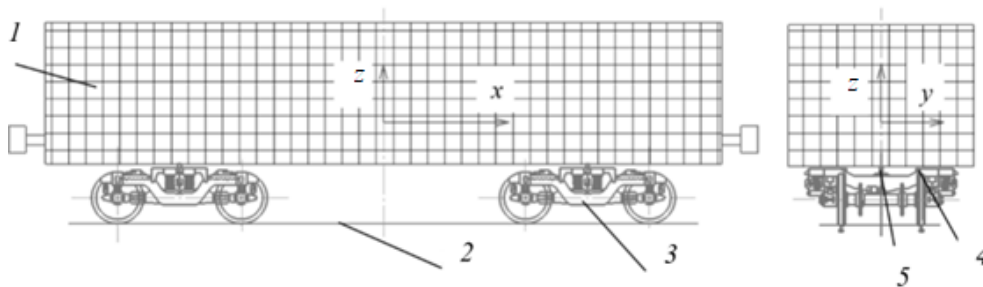
Для каждого варианта конечноэлементной модели были определены основные расчетные критерии, такие как величина первой собственной частоты изгибных колебаний и максимальные напряжения, соответствующие первому и третьему расчетным режимам «Норм проектирования вагонов...».

Разница значений первой собственной частоты изгибных колебаний и максимальных напряжений с экспериментом составляет:

- для первого варианта 10,4 % по частотам, 20 % по напряжениям;
- для второго варианта 8,6 % по частотам, 16 % по напряжениям;
- для третьего варианта 3,2 % по частотам, 12 % по напряжениям;
- для четвертого варианта 1,6 % по частотам, 5,8 % по напряжениям.

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности использования четвертого варианта конечноэлементной модели для расчета первой собственной частоты изгибных колебаний кузова, а также анализа прочности металлоконструкции.

Следующим этапом было установить влияния метода распределения масс по конечноэлементной модели на расчет гибридных динамических моделей с использованием программы «Универсальный механизм». Для этого были созданы гибридные динамические модели, для каждого из четырех вариантов конечноэлементных схем. Варианты динамических моделей пассажирского вагона состоят из кузова, который соединяется силовыми элементами с двумя твердотельными подсистемами – «тележками» (рисунок 2).

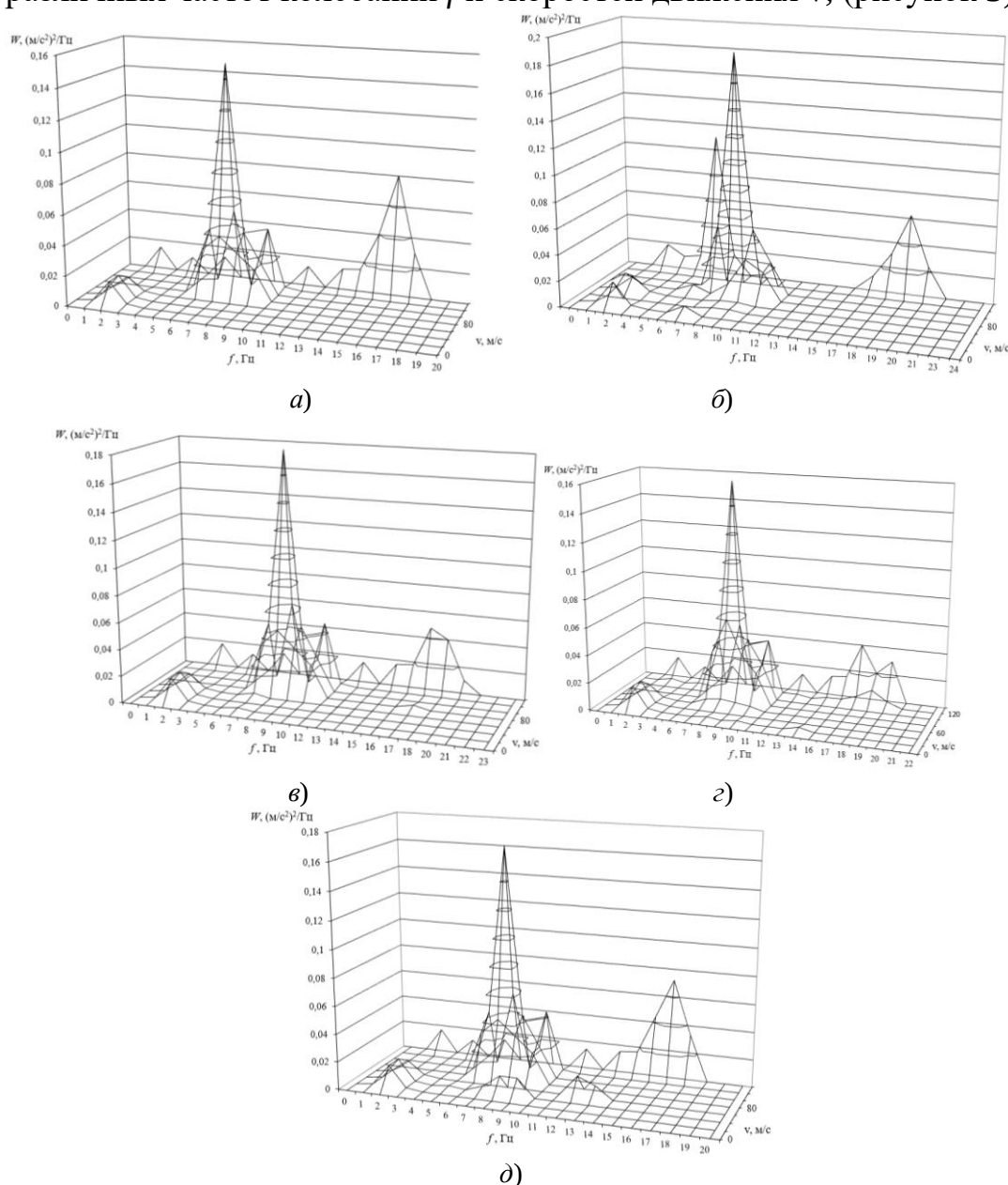


1 – кузов; 2 – неровности рельсового пути; 3 – подсистема «тележка»; 4 – силовой контактный элемент, моделирующий опирание кузова вагона на скользуны; 5 – линейный силовой элемент, моделирующий ограничения горизонтальных перемещений кузова относительно надрессорного бруса в пятниковом узле

Рисунок 2 – Структурная схема гибридной динамической модели пассажирского вагона

Динамическая модель подсистемы «тележка» сформирована совокупностью абсолютно твердых тел с реальными геометрическими и инерциальными характеристиками. Соединение абсолютно твердых тел осуществлено с использованием кинематических и силовых элементов, входящих в стандартный набор программного комплекса. В результате моделирования движения по неровностям пути рассмотренных вариантов гибридной модели были получены зависимости от скорости следующих показателей: вертикальных и горизонтальных ускорений в середине кузова a_v , a_g ; коэффициента вертикальной динамики $K_{дв}$ и рамной силы H_p в зоне подпятника нетормозного конца вагона; величины плавности хода в середине кузова W_v – в вертикальном направлении, W_g – в горизонтальном направлении. Разница экспериментальных данных с показателями, полученными расчетным путем для каждого из вариантов расчетной схемы, не превысила: для первого варианта модели 21,7 %, для второго – 19,8 %, для третьего – 11,15 % для четвертого – 10,7 %, что свидетельствует об адекватности предложенных моделей и целесообразности использования четвертого варианта расчетной схемы.

Дополнительно были рассчитаны и сопоставлены с результатами натурных ходовых испытаний данные спектральной плотности вертикальных ускорений W для различных частот колебаний f и скоростей движения v , (рисунок 3).



а – экспериментальные значения; *б* – первый вариант конечноэлементной модели;
в – второй вариант конечноэлементной модели; *г* – третий вариант конечноэлементной модели;
д – четвертый вариант конечноэлементной модели

Рисунок 3 – Зависимости спектральной плотности вертикального ускорения от частоты колебаний кузова в среднем сечении на уровне пола

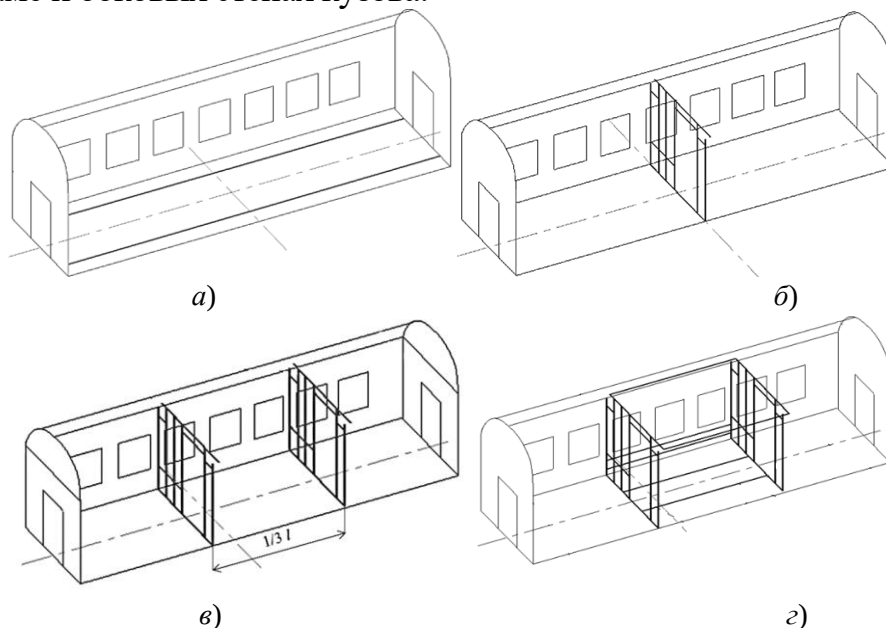
Сопоставление полученных расчетных данных с результатами натурных ходовых испытаний показало, что:

- первый вариант конечноэлементной модели имеет различия на 19...20 % по частотам и на 20...24 % по значениям спектральной плотности мощности;
- второй вариант конечноэлементной модели имеет различия на 14...17 % и 17,5...21 %;
- третий вариант конечноэлементной модели имеет различия на 10...12 % и 12...16 %;
- четвертый вариант конечноэлементной модели имеет различия на 7,0...9,0 % и 9,0...11 %.

Анализ полученных данных позволил сделать выводы о том, что четвертый вариант конечноэлементной модели обеспечивает результаты, более близкие к значениям, полученным при испытаниях, что указывает на то, что данный вариант расчетной схемы наиболее применим для дальнейшего исследования жесткостных характеристик кузова пассажирского вагона.

В **третьем разделе** работы на основе предложенной методики выполнено исследование конструктивных решений, повышающих жесткостные свойства несущей конструкции кузова пассажирского вагона. На основе анализа современных подходов к решению данной задачи были предложены четыре схемы усиления несущей конструкции кузова пассажирского вагона (рисунок 4).

Первая схема предусматривает введение дополнительных продольных элементов в раму (рисунок 4, *а*). В работе рассмотрено 4 варианта сечений продольных элементов. Вторая схема предусматривает установку несущей перегородки в среднем сечении кузова (рисунок 4, *б*). В работе рассмотрено 10 вариантов сечений стоек и стрингеров перегородки. Третья схема предусматривает установку двух несущих перегородок на расстоянии $1/3$ длины рамы друг от друга (рисунок 4, *в*). Сечения подкрепляющих элементов перегородок приняты аналогичными второй схеме усиления. Четвертая схема (рисунок 4, *г*) в отличие от третьей имеет две перегородки, дополнительно связанные продольными элементами зетового сечения, расположенными на крыше, раме и боковых стенах кузова.



а – установка продольных элементов на раме вагона; б – установка несущей перегородки; в – установка двух несущих перегородок; г – установка двух несущих перегородок, связанных между собой продольными элементами

Рисунок 4 – Варианты конструктивных решений по увеличению жесткости кузова

В качестве основных расчетных критериев выбора рационального варианта усиления приняты первая собственная частота изгибных колебаний, максимальные действующие напряжения в зоне усиления конструкции и величина увеличения ее массы.

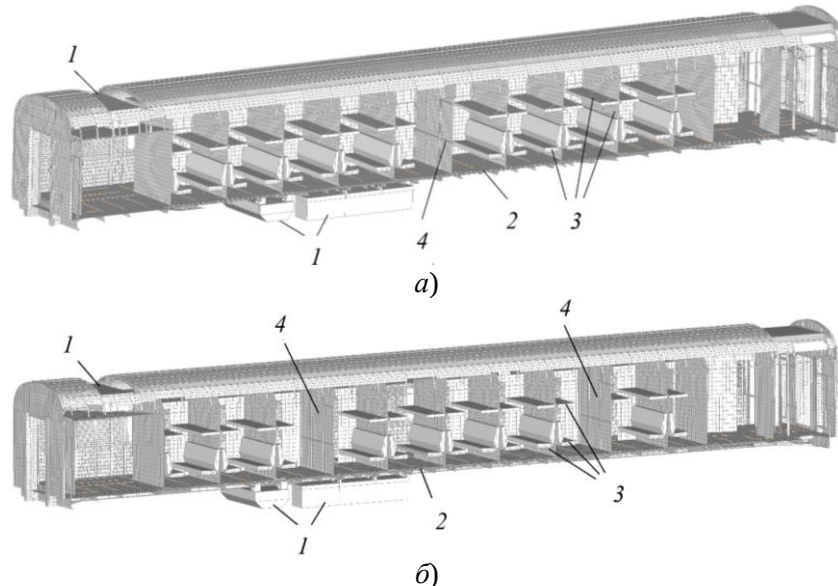
Предложенные конструктивные решения были реализованы в пластинчатой конечноэлементной модели, обоснованной на предыдущем этапе работы.

В качестве критериев выбора рациональной схемы усиления приняты величины первой собственной частоты изгибных колебаний, максимальных напряжений в зоне усиления, от действия нагрузок, соответствующих первому и третьему расчетным режимам «Норм на проектирования вагонов...», а также величина увеличения массы

конструкции кузова. Проанализировав данные конечноэлементных расчетов для каждой схемы усиления, из рассматриваемых вариантов подкрепляющих наборов, были выбраны варианты, обеспечивающие наилучшие показатели принятых критериев оценки. Ими явились:

- усиление рамы вагона введением продольных элементов в виде стального гнутого равнополочного швеллера ГОСТ 8278-83 с размерами $100 \times 60 \times 60 \times 4$;
- установка дополнительной несущей перегородки в среднем сечении кузова, стойки которой выполнены из стального гнутого зетового профиля ГОСТ 13229-78 с размерами $55 \times 50 \times 40 \times 3$ и стального гнутого равнополочного уголка ГОСТ 19771-93 с размерами $55 \times 55 \times 3$, который используется также и для стрингеров;
- установка двух несущих перегородок на расстоянии $1/3$ длины рамы, стойки которых выполнены из стального гнутого зетового профиля ГОСТ 13229-78 с размерами $55 \times 50 \times 40 \times 3$ и стального гнутого равнополочного уголка ГОСТ 19771-93 с размерами $55 \times 55 \times 3$, который используется также и для стрингеров;
- установка двух несущих перегородок на расстоянии $1/3$ длины рамы, стойки которых выполнены из стального гнутого зетового профиля ГОСТ 13229-78 с размерами $55 \times 50 \times 40 \times 3$ и стального гнутого равнополочного уголка ГОСТ 19771-93 с размерами $55 \times 55 \times 3$, который используется также и для стрингеров, связанных между собой продольными элементами в форме перфорированного гнутого зетового профиля размером $40 \times 65 \times 45 \times 2,5$ мм.

Для выбора рациональной расчётной схемы усиления кузова перечисленные выше усиления были внесены в детализированную конечноэлементную модель (рисунок 5), разработанную в рамках методики, описанной во второй главе.



а – вариант модели с одной усиливающей перегородкой; б – вариант модели с двумя усиливающими перегородками:

1 – тяжеловесное оборудование; 2 – пол пассажирского салона;

3 – элементы интерьера пассажирского салона; 4 – усиливающие перегородки

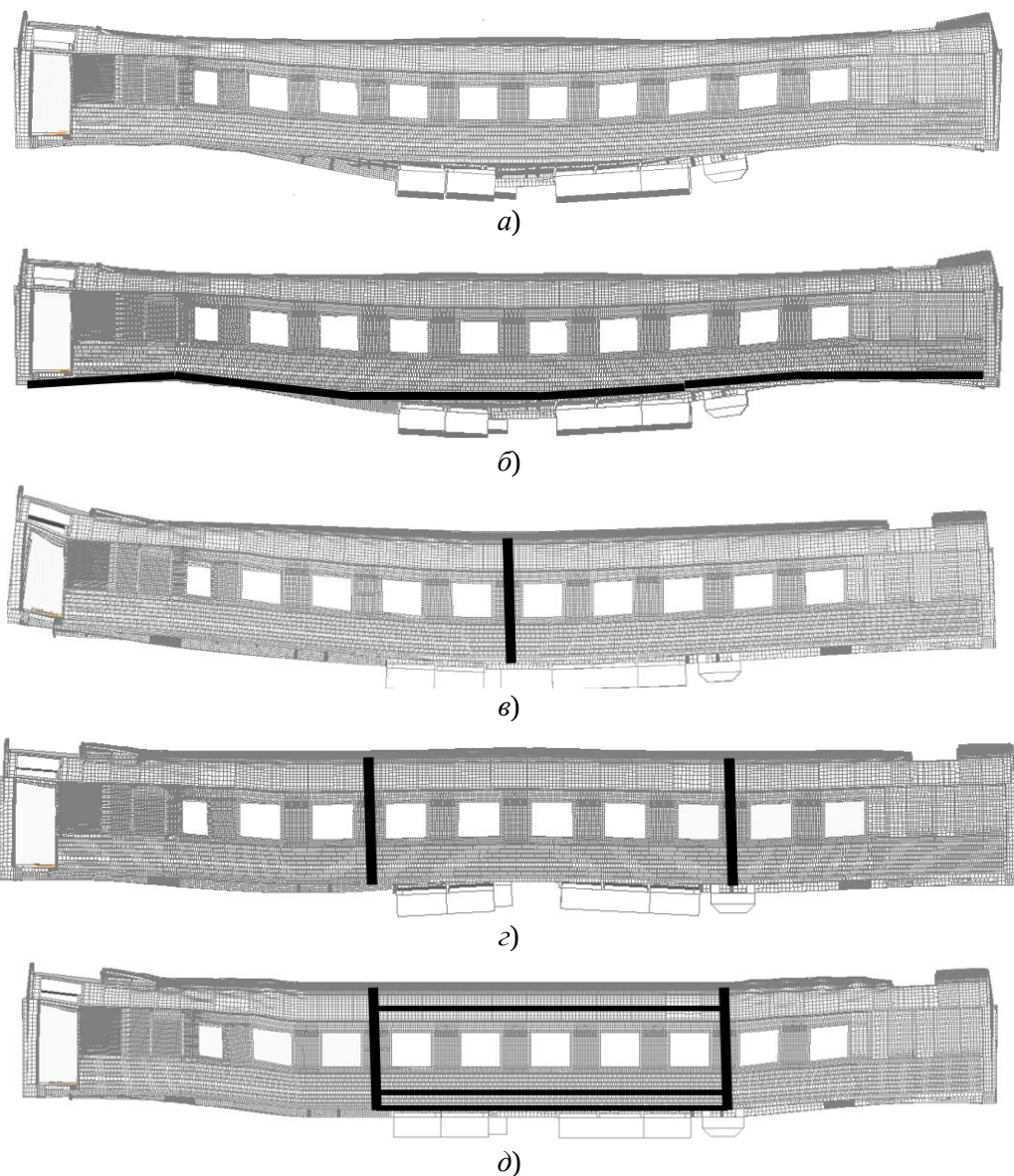
Рисунок 5 – Конечноэлементная модель кузова пассажирского вагона

В результате проведенных расчетов были определены значения основных расчетных критериев для четырех принятых вариантов усиления (таблица 1).

В результате анализа полученных результатов установлено, что первая схема усиления обеспечивает наименьший результат при значительном увеличении массы. Рассчитанные значения прогибов в среднем сечении кузова от вертикальной нагрузки уменьшились на 2,8 % на хребтовой балке и на 2,3 % на нижней обвязке (рисунок 6, б).

Таблица 1 – Значения основных расчетных критериев

Номер схемы усиления	Первая собственная частота, Гц	Максимальные действующие напряжения, МПа	Увеличение массы, кг
1	8,19	178,2	199
2	8,18	173,9	79
3	8,53	168,3	159
4	8,92	167,2	282



а – вариант базовый; б – вариант с усиленной рамой; в – вариант модели с одной усиливающей перегородкой; г – вариант модели с двумя усиливающими перегородками; д – вариант модели с двумя усиливающими перегородками, связанными продольными элементами

Рисунок 6 – Формы колебаний кузова пассажирского вагона

Вторая схема усиления кузова с помощью перегородки, установленной в середине вагона, повышает жесткость контура поперечного сечения, при этом обеспечивая только локальный эффект. При этом увеличение массы, в сопоставлении с первой схемой, ниже практически в 2,5 раза. Значения прогибов в среднем сечении кузова от вертикальной нагрузки уменьшились на 3,5 % на хребтовой балке и на 3,2 % на нижней обвязке (рисунок 6, в).

Третья схема усиления, в отличие от второй, повышает жесткость контура на большую длину базы вагона, вместе с тем наблюдается изменение формы

колебаний кузова с одной волны на две. Значительное увеличение жесткости кузова влечет за собой увеличение его массы сопоставимо с вторым вариантом усиления. Значения прогибов в среднем сечении кузова от вертикальной нагрузки уменьшились на 4,15 % на хребтовой балке и на 3,8 % на нижней обвязке (рисунок 6, з).

Четвертая схема усиления в отличие от третьей не имеет недостатка, связанного с совместными колебаниями усиливающих перегородок. Данный вариант имеет продольные элементы, усиливающие узлы кузова, что дает возможность двум перегородкам действовать в виде одной жесткой системы. При этом действующие напряжения максимально снижаются, а увеличение массы составляет 282 кг. При этом значения прогибов в среднем сечении кузова от вертикальной нагрузки уменьшились на 4,34 % на хребтовой балке и на 4,0 % на нижней обвязке (рисунок 6, д).

В результате проведенного исследования было установлено, что четвертая схема усиления, включающая установку двух несущих перегородок, связанных между собой продольными несущими элементами, наиболее эффективна в качестве способа для повышения жесткости кузова пассажирского вагона.

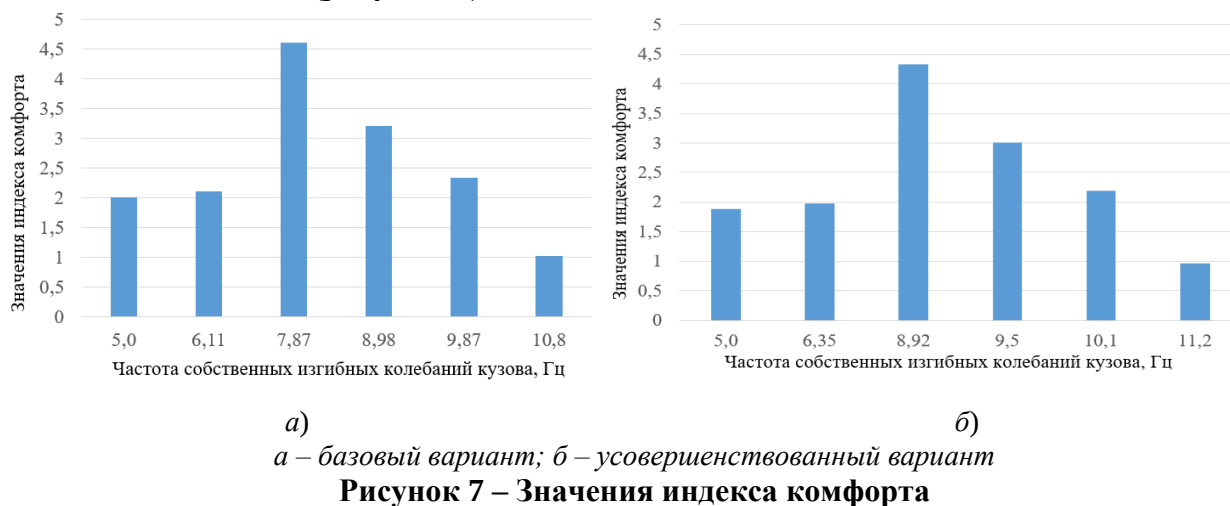
В четвертом разделе работы произведена оценка эффективности предложенного конструктивного решения в сравнении с базовой конструкцией вагона. Для этого с использованием разработанной гибридной динамической модели определены основные динамические характеристики вагона: вертикальные и горизонтальные ускорения в середине кузова a_v , a_r ; коэффициент вертикальной динамики $K_{дв}$ и рамная сила H_p в зоне подпятника нетормозного конца вагона; величины плавности хода в середине кузова W_v – в вертикальном направлении, W_r – в горизонтальном направлении; λ – коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса; коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса по критерию М. Надаля – Nad и критерию Вайнштоку – Wa ; $F_{y\max}$ – максимальная сила отжатия рельса.

В результате сопоставления принятых показателей динамики вагона, полученных для исходной конструкции и усовершенствованной было установлено, что:

- вертикальные ускорения кузова снизились на 6,52...8,24 % – на прямых участках пути; на 6,13...8,75 % – в кривых;
- горизонтальные ускорения кузова снизились на 3,45...7,85 % – на прямых участках пути; на 3,65...8,7 % – в кривых;
- коэффициент вертикальной динамики снизился на 1,0...1,5 % – на прямых участках пути; на 1,0...2,1 % – в кривых;
- рамные силы увеличились на 0,3...3,08 % – на прямых участках пути; на 0,1...1,9 % – в кривых;
- показатели плавности хода на прямых участках пути в вертикальном направлении снизились на 5,68...8,74 %;
- показатели плавности хода на прямых участках пути в горизонтальном направлении снизились на 5,68...8,9 %;
- коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса увеличился на 0,8...2,4 %;
- коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса по критерию М. Надаля – Nad снизился на 1,6...2,6 % и критерию Вайнштоку – Wa снизился на 1,8...2,8 %;
- максимальная сила отжатия рельса увеличилась на 1,24...2,77 % – на прямых участках пути; на 1,16...2,22 % – в кривых;

Оценка полученных результатов свидетельствует о работоспособности и эффективности принятого рационального варианта конструкции.

Дополнительно была выполнена оценка влияния принятого конструктивного решения на уровень комфорта пассажиров. Оценка проводилась путем расчета индекса комфорта для сидящих пассажиров, регламентируемого европейским стандартом CEN 12299:2009. Результаты оценки уровня комфорта приведены в виде гистограмм соответствующего индекса для рассматриваемых собственных частот изгибных колебаний (рисунок 7).



Анализируя полученные результаты, можно сделать выводы, что предложенные конструктивные решения позволяют улучшить динамические характеристики вагона на величины от 2,1 % до 8,9 % и уровень комфорта до 6 %, что в итоге указывает на эффективность конструктивных решений, полученных с использованием предложенной в работе методики по повышению жесткости несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Выполнен обзор существующих несущих систем современных кузовов пассажирских вагонов и критериев оценки их жесткостных характеристик. В качестве основного критерия принята первая собственная частота изгибных колебаний кузова.

2 Проанализированы существующие методы определения первой собственной частоты изгибных колебаний. Наиболее применимым для решения поставленных задач является метод конечных элементов, реализованный в среде промышленных программных комплексов. На основе проведенного анализа предложена уточненная методика определения первой собственной частоты изгибных колебаний.

3 Разработана уточнённая методика оценки первой собственной частоты изгибных колебаний кузова с использованием детализированных конечноэлементных моделей, на основе которой выполнен анализ влияния способа распределения массы кузова вагона по узлам конечноэлементной модели на результаты расчета первой собственной частоты изгибных колебаний. Созданы четыре варианта расчетных схем с различным распределением массы тяжеловесного оборудования и элементов внутреннего интерьера салона. Анализ полученных

результатов показал, что разница значений первой собственной частоты изгибных колебаний и максимальных напряжений с экспериментом составляет: для первого варианта 10,4 % по частотам, 20 % по напряжениям; для второго 8,6 % по частотам, 16 % по напряжениям; для третьего 3,2 % по частотам, 12 % по напряжениям; для четвертого 1,6 % по частотам, 5,8 % по напряжениям. Что свидетельствует о целесообразности использования конечноэлементных моделей с реальным распределением массы тяжеловесного оборудования и элементов внутреннего интерьера салона для расчета первой собственной частоты изгибных колебаний кузова, а также анализа прочности металлоконструкции.

4 Выполнен анализ влияния способа распределения массы кузова вагона по узлам конечноэлементной модели на результаты моделирования движения вагона по неровностям пути. Определены основные динамические характеристики вагона, анализ которых позволил сделать выводы о том, что максимальное расхождение первого варианта гибридной динамической модели составляет 16,26 %, а четвертого – 7,15 %.

5 Произведен анализ методов повышения жесткости несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов, на основе которого разработаны варианты конструктивных решений, обеспечивающих повышение жесткости несущей конструкции кузова купейного пассажирского вагона.

6 Принято усиление кузова за счет установки двух несущих перегородок на расстоянии $1/3$ длины рамы, стойки которых выполнены из стального гнутого зетового профиля ГОСТ 13229-78 с размерами $55 \times 50 \times 40 \times 3$ и стального гнутого равнополочного уголка ГОСТ 19771-93 с размерами $55 \times 55 \times 3$, который используется также и для стрингеров; связанных между собой продольными элементами, расположенными на крыше, раме и боковых стенах кузова. Данный вариант обеспечивает повышение жесткости кузова пассажирского вагона при увеличении массы до 282 кг и снижении действующих напряжений до 167,2 МПа.

7 Выполнена оценка эффективности полученного конструктивного решения кузова вагона повышенной жесткости. Путем использования разработанных гибридных динамических моделей движения по неровностям пути были определены установленные критерии оценки эффективности для базовых и улучшенных вариантов. Проведенное сравнение полученных данных показало, что применение конструкторского решения сопровождалось следующими улучшениями динамических показателей: на прямых участках пути вертикальные ускорения кузова снизились на 6,52...8,24 % – на прямых участках пути; на 6,13...8,75 % – в кривых; горизонтальные ускорения кузова снизились на 3,45...7,85 % – на прямых участках пути; на 3,65...8,7 % – в кривых; коэффициент вертикальной динамики снизился на 1,0...1,5 % – на прямых участках пути; на 1,0...2,1 % – в кривых; рамные силы увеличились на 0,3...3,08 % – на прямых участках пути; на 0,1...1,9 % – в кривых; показатели плавности хода на прямых участках пути в вертикальном направлении снизились на 5,68...8,74 %; показатели плавности хода на прямых участках пути в горизонтальном направлении снизились на 5,68...8,9 %; коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса увеличился на 0,8...2,4 %; что подтверждает работоспособность принятого рационального варианта конструкции.

8 Рекомендуется для реализации вариант усиления кузова за счет установки двух несущих перегородок на расстоянии $1/3$ длины рамы, стойки которых выполнены из стального гнутого зетового профиля ГОСТ 13229-78 с размерами

55×50×40×3 и стального гнутого равнополочного уголка ГОСТ 19771-93 с размерами 55×55×3, который используется также и для стрингеров, связанных между собой продольными элементами, расположенными на крыше, раме и боковых стенах кузова. Данный вариант позволяет увеличить жесткость кузова, снижая напряжения при незначительном увеличении массы.

9 Перспективой дальнейшей разработки темы является совершенствование уточненной методики расчета первой собственной частоты изгибных колебаний кузова за счет учета сил трения между элементами интерьера салона и при взаимодействии их с несущей конструкцией кузова. Исследование возможности повышения жесткости кузова за счет применения многослойных оболочек. Разработка методики анализа уровня комфорта пассажиров за счет применения антропометрических манекенов.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

а) в рецензируемых научных изданиях:

1 **Лукашова, Е. В.** Обоснование методики анализа комфорта и безопасности при перевозках пассажиров за счет уменьшения вибрационной нагруженности кузова пассажирского вагона / Д. Я. Антипин, Е. В. Лукашова, П. Д. Жиров // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 2(99). – С. 44-50. – DOI 10.30987/1999-8775-2021-2-44-50. – EDN RRGQW.

2 **Лукашова, Е. В.** Совершенствование методики оценки вибрационной нагруженности кузова пассажирского вагона / Д. Я. Антипин, Е. В. Лукашова, А. П. Болдырев, Ф. Ю. Лозбинев // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 4(16). – С. 39-46. – DOI 10.30987/2782-5957-2023-4-39-46. – EDN JJMIGA.

3 **Лукашова, Е. В.** Обоснование конструктивных решений по повышению жесткости несущей конструкции кузова пассажирского вагона / Д. Я. Антипин, Е. В. Лукашова, А. П. Болдырев, Ф. Ю. Лозбинев // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 5(17). – С. 60-68. – DOI 10.30987/2782-5957-2023-5-60-68. – EDN TWKNOC.

б) в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus:

1 **Lukashova, E. V.** Technique of increasing passenger comfort by ensuring rational parameters of flexural stiffness of bodies of passenger cars / D. Y. Antipin, E. V. Lukashova // Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018 : Lecture notes in mechanical engineering, Москва, 15–18 мая 2018 года. – Москва: Springer International Publishing, 2019. – P. 2339-2345. – DOI 10.1007/978-3-319-95630-5_252. – EDN ZGGKZK.

в) в других изданиях и материалах конференций:

1 **Лукашова, Е. В.** Динамика движения кузова пассажирского вагона / Е. В. Лукашова // Новые горизонты: Материалы IV Международной конференции-конкурса, Брянск, 28 марта 2017 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2017. – С. 79-81. – EDN YQHYSP.

2 **Лукашова, Е. В.** Анализ вибрационной нагруженности кузова пассажирского вагона и его влияние на комфорт перевозок / Е. В. Лукашова, С. Н. Ашуркова, М. В. Мануева // Прогрессивные технологии и процессы : Сборник научных статей 4-й Международной молодежной научно-практической конференции, Курск, 21–22 сентября 2017 года / Ответственный редактор

А.А. Горохов. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2017. – С. 104-107. – EDN ZJQIMJ.

3 **Лукашова, Е. В.** Анализ ходовой динамики кузовов пассажирских вагонов / Е. В. Лукашова // Повышение эффективности транспортных машин. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2017. – С. 199-204. – EDN ZUDUDD.

4 **Лукашова, Е. В.** Анализ влияния жесткости несущей конструкции кузова пассажирского вагона на безопасность и комфорт перевозок пассажиров / Е. В. Лукашова // Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС-2017): материалы конференции, Москва, 06–08 декабря 2017 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2018. – С. 76-79. – EDN YOZFTD.

5 **Лукашова, Е. В.** Обоснование методики повышения комфорта и безопасности при перевозках пассажиров на железнодорожном транспорте за счет уменьшения вибрационной нагруженности кузова пассажирского вагона / Д. Я. Антипин, Е. В. Лукашова // Перспективное развитие науки, техники и технологий : Сборник научных статей материалы 8-й Международной научно-практической конференции, Курск, 24–25 октября 2018 года / Ответственный редактор А.А. Горохов. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2018. – С. 10-12. – EDN YNNZYD.

6 **Лукашова, Е. В.** Обоснование методики оценки комфорта и безопасности на железнодорожном транспорте при перевозках пассажиров / Е. В. Лукашова // Новые горизонты : Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию БГТУ, Брянск, 21 марта 2019 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2019. – С. 70-73. – EDN PBQNGK.

7 **Лукашова, Е. В.** Анализ и оценка комфорта при поездке пассажиров на железнодорожном транспорте на основе индекса комфорта / Е. В. Лукашова // Новые горизонты : Материалы VII научно-практической конференции с международным участием, Брянск, 20 марта 2020 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2020. – С. 87-90. – EDN IPYQEK.

8 **Лукашова, Е. В.** Оценка влияния вибраций кузова железнодорожного транспорта на пассажиров / Д. Я. Антипин, Е. В. Лукашова // Проблемы и перспективы развития России: молодежный взгляд в будущее : сборник научных статей 3-й Всероссийской научной конференции, Курск, 15–16 октября 2020 года. Том 4. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 116-118. – EDN KDOJEE.

9 **Лукашова, Е. В.** Исследование упругих колебаний кузова пассажирского вагона / Е. В. Лукашова // Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике : сборник научных трудов 3-й Международной научно-технической конференции, Курск, 07 апреля 2021 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 166-168. – EDN OVKJMH.

10 **Лукашова, Е. В.** Оценка качества перевозок пассажиров с использованием методов математического моделирования / Е. В. Лукашова, Н. А. Лукашов // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических

и технологических систем : Сборник научных трудов 3-й Всероссийской научно-технической конференции, Курск, 28 мая 2021 года / Редколлегия: Е.В. Павлов. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 224-226. – EDN MAAAQI.

11 **Лукашова, Е. В.** Анализ методов вычисления собственных частот колебаний кузова пассажирского вагона / Е. В. Лукашова, Н. А. Лукашов // Наука, техника, инновации: Сборник статей Научно-технической конференции, Брянск, 01–03 апреля 2023 года. – Брянск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2023. – С. 28-31. – EDN HQPNYQ.

12 **Лукашова, Е. В.** Повышению жесткости несущей конструкции кузова пассажирского вагона / Е. В. Лукашова, Н. А. Лукашов // Школа молодых новаторов : сборник научных статей 4-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск, 13 июня 2023 года / Северо-Кавказский федеральный университет, Пятигорский институт. Том 2. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2023. – С. 310-314. – EDN QUHFFK.

Лукашова Елена Витальевна

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ
ЖЕСТКОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ КУЗОВОВ
ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 21.10.2024 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Офсетная печать. Печ. л. 1,0. Усл. изд. л. 1,0.
Тираж____ экз. Заказ____. Бесплатно.

Издательство Брянского государственного технического университета
241035, г. Брянск, бульвар 50лет Октября, 7.
Подразделение оперативной полиграфии БГТУ, ул. Харьковская, 9