

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



**Ашуркова Светлана Николаевна**

**ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ  
КОНСТРУКЦИИ КУЗОВА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА  
С ПЕРФОРИРОВАННЫМИ ПОДКРЕПЛЯЮЩИМИ  
ЭЛЕМЕНТАМИ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов  
и электрификация

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат технических наук, доцент  
Антипин Дмитрий Яковлевич

Москва – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ И АНАЛИЗА ПРОЧНОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ КУЗОВОВ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ .....	9
1.1 Актуальность исследования.....	9
1.2 Обзор несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов .....	13
1.2.1 Обзор конструкций боковых стен пассажирских вагонов зарубежного производства .....	13
1.2.2 Обзор конструкций боковых стен пассажирских вагонов отечественного производства .....	19
1.3 Обзор методов прочностных исследований.....	28
1.4 Выводы по разделу 1 .....	33
2 РАЗРАБОТКА ДЕТАЛИЗИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ КУЗОВА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА .....	36
2.1 Описание объекта исследования .....	36
2.2 Требования к несущим конструкциям кузовов пассажирских вагонов ..	39
2.3 Исследование особенностей применения методов компьютерного моделирования для оценки параметров несущей конструкции кузова вагона .....	42
2.3.1 Оценка массы несущей конструкции.....	42
2.3.2 Применение МКЭ для оценки прочности, устойчивости и частоты собственных изгибных колебаний конструкции .....	43
2.3.3 Оценка усталостной долговечности несущей конструкции .....	49
2.4 Разработка твердотельной модели кузова пассажирского вагона .....	51
2.5 Разработка и верификация пластинчатой конечноэлементной модели кузова пассажирского вагона .....	52
2.6 Разработка конечноэлементной модели кузова с внутренним и навесным оборудованием.....	58
2.7 Разработка и верификация гибридной динамической модели пассажирского вагона .....	62
2.8 Выводы по разделу 2 .....	68
3 ВЫБОР ТИПА И ПАРАМЕТРОВ ПЕРФОРАЦИИ ПОДКРЕПЛЯЮЩЕГО НАБОРА КУЗОВА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА С НЕГОФРИРОВАННОЙ ОБШИВКОЙ БОКОВЫХ СТЕН .....	69

3.1 Разработка конечноэлементной модели кузова с негофрированной обшивкой боковых стен.....	69
3.2 Разработка детализированных моделей кузовов вагонов с перфорированными подкрепляющими элементами.....	72
3.3 Исследование особенностей применения суперэлементного редуцирования для разработки расчетных моделей.....	75
3.4 Разработка конечноэлементных моделей кузова с перфорированными подкрепляющими элементами методом суперэлементного редуцирования.....	80
3.5 Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния перфорированной и сплошной балок.....	83
3.6 Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния перфорированной и сплошной балок.....	90
3.7 Уточненная конечноэлементная модель зоны обшивки с перфорированным подкрепляющим элементом.....	93
3.8 Выводы по разделу 3.....	100
4 ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ КОНСТРУКЦИИ КУЗОВА ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА С ПЕРФОРИРОВАННЫМИ ПОДКРЕПЛЯЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ.....	102
4.1 Оценка влияния вариантов несущей конструкции кузова на их напряженно-деформированное состояние.....	102
4.2 Оценка влияния вариантов несущей конструкции кузова на снижение величины их массы.....	105
4.3 Оценка влияния вариантов несущей конструкции кузова на устойчивость сжатых элементов подкрепляющего набора и элементов обшивки.....	106
4.4 Оценка влияния вариантов несущей конструкции кузова на значение собственных частот изгибных колебаний.....	107
4.5 Оценка влияния вариантов несущей конструкции кузова на их усталостную долговечность.....	108
4.6 Выводы по разделу 4.....	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	138

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Железнодорожный транспорт составляет основу транспортной системы Российской Федерации, соединяя удаленные территории, обладающие своими природными особенностями и ресурсами.

На период с января по апрель 2019 г. пассажирооборот железнодорожного транспорта, по предварительным данным, составил 33,9 млрд. пасс. -километров, что составляет 21,4% пассажирооборота транспорта общего пользования [1]. Приведенные показатели говорят о значимости железнодорожного транспорта в обеспечении потребности граждан в перевозках и реализации условий, выравнивающих социально-экономическое развитие регионов нашей страны.

К современному пассажирскому подвижному составу предъявляются все более высокие требования по безопасности, надежности, прочности, комфортности перевозок, а также к эстетичному внешнему виду при минимизации времени на проектирование нового подвижного состава, себестоимости его изготовления и эксплуатационных затрат.

Значительная часть требований может быть удовлетворена особенностями конструкции несущей системы кузова пассажирского вагона, в частности – типом несущей системы боковых стен, определяющую роль в которой играют панели обшивки.

В области пассажирского вагоностроения в мире широкое распространение получили несущие конструкции кузова в виде подкрепленных тонкостенных оболочек с негофрированной наружной обшивкой. Данное конструктивное решение позволяет удовлетворить требования эстетики, предъявляемые к кузовам вагонов, снизить металлоемкость кузова, а также затраты на нанесение лакокрасочных покрытий, позволяет повысить коррозионную стойкость кузова. Однако применение оболочек с плоской негофрированной несущей обшивкой предъявляет жесткие требования к подкрепляющему набору элементов. Система подкрепляющих элементов должна обеспечивать прочность и устойчивость обшивки во всех эксплуатационных режимах, включая ремонтные, а также безопасность пассажиров в аварийных ситуациях. При этом система должна иметь минимальную массу и геометрические размеры, и обладать необходимой долговечностью.

Выбор рационального конструктивного решения, удовлетворяющего выше приведенным требованиям, возможен на основе методов математического и компьютерного моделирования с применением современных промышленных программных комплексов.

**Степень разработанности темы.** Исследованию в области обеспечения статической и динамической прочности и совершенствованию несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов, в том числе с использованием методов компьютерного моделирования, посвящены труды А.А. Юхневского, С.Л. Самошкина, П.С. Ломакова, А.Н. Скачкова, С.Д. Коршунова, Д.И. Гончарова [2-8], Е.В. Афанасьева [9], В.М. Мейстера [10], В.В. Кобищанова, Д.Я. Антипина [11-13], А.М. Орловой [14], Ю.М. Черкашина [15], Ю.С. Ромена [16], А.М. Краснобаева [17], А.В. Пигунова [18], Н.С. Бачурина, К.М. Колясова [19], В.И. Приходько [20], О.А. Шкаброва [21] и др.

Среди зарубежных ученых, исследующих нагруженность несущих конструкций пассажирского подвижного состава, можно выделить труды С. Baykasoglu, Т. Toprak, А. Mугan [22,23], J.W. Simons [24], М. Bingrong [25], F. Sui [26], J. König, J. Winter, M. Schön [27] и др.

Исследование перфорированных балок и выбора рациональных параметров перфорации отражено в трудах А.И. Притыкина, А.С. Лавровой [28-32], К.А. Емельянова [33], В.И. Филимонова [34], А.А. Ильиной [35], А.В. Соловьева, И.А. Васюкова, И.С. Холопова [36,37], S.S. Fares [38], А.М. Jamadar, P.D. Kumbhar [39], N.K. Chhapkhane, R.K. Shashikant [40].

**Цели и задачи.** Целью диссертации является разработка и научное обоснование проектных решений для рационализации несущей конструкции кузова пассажирского вагона с негофрированной обшивкой боковых стен с применением перфорированных элементов.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи.

1 Разработана методика обоснования выбора типа и параметров перфорации элементов подкрепляющего набора кузова пассажирского вагона.

2 Разработана и верифицирована проблемно-ориентированная конечноэлементная расчетная модель несущей конструкции кузова пассажирского вагона.

3 Определены варианты несущей конструкции боковой стены кузова пассажирского вагона с перфорированными подкрепляющими элементами.

4 Разработаны и верифицированы конечноэлементные расчетные модели несущей конструкции кузова пассажирского вагона с перфорированными подкрепляющими элементами.

5 Разработана и верифицирована динамическая модель пассажирского вагона и на ее основе выполнена оценка динамической нагруженности кузовов пассажирских вагонов с перфорированными подкрепляющим элементами.

6 Оценена эффективность и соответствие требованиям нормативной документации предлагаемых конструктивных решений несущей конструкции кузова пассажирского вагона.

#### **Научная новизна.**

1 Разработана методика обоснования выбора типа и параметров перфорации элементов подкрепляющего набора кузова пассажирского вагона.

2 Созданы компьютерные модели пассажирского вагона с перфорированным набором подкрепляющих негофрированную обшивку элементов методом конечных элементов и суперэлементного редуцирования. Данные модели позволяют с достоверной точностью выполнять компьютерный анализ напряженно-деформированного состояния.

3 Оценено влияние перфорированных подкрепляющих элементов кузова пассажирского вагона на его технические характеристики.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

1 Методика обоснования выбора типа и параметров перфорации элементов подкрепляющего набора кузова пассажирского вагона может быть применена на этапе проектирования новых пассажирских вагонов.

2 Рекомендованный вариант подкрепления обшивки кузова пассажирского вагона позволяет обеспечить снижение тары вагона с учетом обеспечения его прочности, жесткости и устойчивости сжатых элементов конструкции и снизить стоимость жизненного цикла.

3 Разработанная несущая конструкция боковой стены может быть использована в конструкциях кузовов отечественных пассажирских вагонов нового поколения.

**Методология и методы исследования.** Для теоретического определения статической и динамической нагруженности несущих конструкций кузовов вагонов использованы методы компьютерного моделирования, основывающиеся на методах конечных элементов и суперэлементного редуцирования. В натурных исследованиях по определению статической нагруженности перфорированного профиля выполнено испытание тестового образца.

**Положения, выносимые на защиту.**

1 Методика обоснования выбора типа и параметров перфорации элементов подкрепляющего набора кузова пассажирского вагона.

2 Разработка проблемно-ориентированных конечноэлементных расчетных моделей несущей конструкции кузова пассажирского вагона с перфорированным подкрепляющим набором.

3 Верификация данных о местном напряженно-деформированном состоянии подкрепляющих элементов в зонах перфорации разработанных моделей.

4 Результаты оценки статической и динамической нагруженности кузовов пассажирских вагонов с различными вариантами перфорации подкрепляющих элементов.

5 Выбор рациональной несущей конструкции кузова пассажирского вагона по критериям снижения массы, обеспечения прочности, жесткости, устойчивости и усталостной долговечности.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов работы подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов расчетов с данными натурных статических, динамических и поездных испытаний, проведенных ЗАО НО «Тверской институт вагоностроения» (ЗАО НО «ТИВ»).

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 6 научно-технических и научно-практических конференциях: «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании» (БГТУ, 2015 г.), «Проблемы и перспективы развития вагоностроения» (БГТУ, 2016 г., 2019 г.), «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления»

(ГГТУ им. П.О. Сухого, 2016 г.), «Будущее машиностроения России» (МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016 г.), «Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения» (ГрГУ, 2017 г.), «Техника и технологии наземного транспорта» (УрГУПС, 2018 г.).

Основные положения диссертации и научные результаты опубликованы в 24 работах. Из них 3 опубликованы в журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованный ВАК России для публикации научных результатов диссертаций и 1 статья в журнале, входящем в международную базу цитирования Scopus.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» на кафедре «Подвижной состав железных дорог».

**Объект исследования.** Кузов пассажирского вагона модели 61-4447 производства ОАО «Тверской вагоностроительный завод» (ОАО «ТВЗ»).

**Личный вклад соискателя.**

1 Разработана методика обоснования выбора типа и параметров перфорации элементов подкрепляющего набора кузова пассажирского вагона.

2 Выбраны характеристики подкрепляющего набора боковых стен кузова с негофрированной обшивкой и схема их размещения по высоте стены кузова.

3 Разработаны проблемно-ориентированные конечноэлементные модели несущей конструкции кузова пассажирского вагона с десятью вариантами перфорации подкрепляющего набора.

4 Разработана гибридная динамическая модель пассажирского вагона.

5 Оценена статическая и динамическая нагруженность, а также усталостная долговечность кузова пассажирского вагона с учетом примененной несущей системы.

6 Оценена эффективность предлагаемых технических решений по обеспечению жесткости и устойчивости кузова пассажирского вагона.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы, состоящего из 169 наименований. Общий объем диссертации составляет 138 страниц машинописного текста, содержит 64 рисунка и 16 таблиц.

# 1 ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ И АНАЛИЗА ПРОЧНОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ КУЗОВОВ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

## 1.1 Актуальность исследования

На современном этапе социально-экономического развития России одной из главных задач в сфере железнодорожного транспорта является разработка конкурентоспособного подвижного состава, обеспечивающего выход на мировой уровень по технологическому и техническому развитию.

Согласно Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года на перспективу предполагаются высокие темпы роста пассажирооборота не только по территории России, но и в основных международных направлениях. Для этого предусмотрено производство подвижного состава нового поколения, к которому предъявляются более жесткие требования, такие как минимизация затрат за жизненный цикл эксплуатации с одновременным увеличением скоростей движения [41].

Проектирование вагонов должно осуществляться с учетом необходимой прочности и коррозионной стойкости конструкции, рационального снижения массы, целесообразной унификации с обеспечением надежности и безопасности эксплуатации конструкции в соответствии с ГОСТ 34093.

Сегодня на сети железных дорог России широко эксплуатируется подвижной состав зарубежного производства. К нему относятся: промежуточные вагоны скоростного электропоезда «Talго 250» компании Patentes Talго S.L. (Испания), используемые в составе скоростного поезда «Стриж»; высокоскоростной электропоезд «Сапсан» производства компании Siemens AG (Германия); скоростной электропоезд Pendolino SM6 «Аллегро» производства компании Alstom (Италия); электропоезд нового поколения «Ласточка» компании Siemens AG (Германия). Данный подвижной состав был введен в эксплуатацию на сети железных дорог России в относительно короткие сроки: с 2009 г. по 2013 г. Применение зарубежного

подвижного состава для сообщения в России можно объяснить отсутствием отечественных поездов, способных реализовать высокую эксплуатационную скорость при одновременном сохранении эксплуатационной рентабельности.

Основным производителем пассажирского подвижного состава в России является ОАО «ТВЗ», ориентирующийся в основном на производство несамоходного подвижного состава. Несамоходные пассажирские вагоны дальнего и местного следования составляют более 70 % пассажирского вагонного парка России.

Главной и одной из самых ответственных частей всех пассажирских вагонов является его кузов. Несущая конструкция кузова по большей части определяет стоимость жизненного цикла вагона и его эксплуатационные характеристики.

Несущие конструкции кузовов пассажирских вагонов по материалу изготовления можно разделить на две основные группы:

- изготовленные из алюминиевых сплавов и полимерных материалов;
- цельнометаллические.

Из алюминиевых сплавов и полимерных материалов изготавливают кузова скоростных и высокоскоростных вагонов зарубежного производства серий: Shinkansen (Япония), TGV (Франция), ICE (Германия), AVE (Испания), Pendolino (Италия) и др. Для отечественного вагоностроения применение алюминиевых материалов не нашло широкого применения (скоростной электропоезд ЭР200, скоростные пассажирские вагоны РТ200, электропоезд «Сокол-250») в связи с высокой стоимостью материалов, а также сложности технологии изготовления [42]. В настоящее время для российских условий наиболее применимы кузова, выполненные из конструкционных сталей.

Несущие конструкции кузовов современных пассажирских несамоходных вагонов выполняются цельнометаллическими, изготовленными из углеродистых и нержавеющей сталей. В кузове пассажирского вагона рама, боковые, торцевые стены и крыша образуют единую оболочечную подкрепленную несущую конструкцию. В качестве подкрепляющих элементов кузова выступают продольные и поперечные элементы жесткости (обвязки, стойки, стрингеры, дуги,

балки), образующие каркас кузова, приваренный к обшивке, а также гофры и выштамповки самой обшивки.

Разработка рациональной несущей конструкции кузова пассажирского вагона, обладающего минимальной металлоемкостью при обеспечении прочности, устойчивости, усталостной долговечности и технологичности конструкции, с учетом удовлетворения требований к эстетичному внешнему виду вагона, возможна выбором обшивки и подкрепляющего набора элементов несущей конструкции боковых стен кузова, так как боковые стены (вместе с рамой) являются самыми нагруженными элементами в эксплуатации и составляют более 20% металлоконструкции кузова вагона. Рационализация боковых стен ведет к обеспечению улучшения эксплуатационных характеристик кузова в целом.

Классификация конструкций боковых стен пассажирских вагонов представлена на рисунке 1.1.

Современные кузова пассажирских вагонов выполняются цельнонесущими. Несущий металлический каркас сегодня используется в трамвайных вагонах, наружная обшивка которых частично или целиком может выполняться из стеклопластика (модели ЛМ-2008, 71-403, 71-608 и др.).

Боковые стены пассажирских вагонов в проекции в плане могут быть плоскими или изогнутыми. Задание обшивке начальной погиби чаще всего используется в скоростных и высокоскоростных вагонах зарубежного производства («Talgo 250», «Сапсан», «Аллегро» и др.).

Повсеместно для стальных цельнометаллических пассажирских вагонов себя зарекомендовали плоские конструкции боковых стен.

Боковые стены могут быть выполнены с негофрированной или гофрированной обшивкой. Гофрированная обшивка отличается профилем гофров и их шагом. Подкрепление негофрированной обшивки обеспечивается продольными элементами жесткости, внутренней гофрированной обшивкой или многослойной структурой, включая сотовые конструкции [43,44].



**Рисунок 1.1 – Классификация конструкций боковых стен пассажирских вагонов**

Учитывая выше сказанное, задача рационализации несущей конструкции боковых стен несамоходных пассажирских вагонов является актуальной и требует проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по изучению конструкций пассажирского подвижного состава ведущих отечественных и зарубежных производителей.

## 1.2 Обзор несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов

### 1.2.1 Обзор конструкций боковых стен пассажирских вагонов зарубежного производства

В конце 1960-х годов в США был разработан пассажирский вагон Comet локомотивной тяги для пригородного сообщения. И до 2004 г. было выпущено пять серий вагонов данного типа. Вагоны Comet I – Comet IV имеют кузов с негофрированной обшивкой, изготовленный из алюминиевого сплава. Несущая система кузовов выполнена из сэндвич-панелей, состоящих из наружных алюминиевых листов, между которыми располагаются различные материалы, включая фанеру, полимерные пены или алюминиевые соты [45]. Вагоны Comet V, постройки 1999-2004 гг., отличаются от предыдущих серий кузовом, выполненным из нержавеющей стали.

На основе дизайна вагона Comet II в период с 1988 г. по 1990 г. были выпущены вагоны Horizon с негофрированной обшивкой боковых стен (рисунок 1.2), которые и сегодня находятся в эксплуатации.



**Рисунок 1.2 – Пассажирский вагон междугороднего сообщения Horizon (Bombardier Transportation)**

В США широкое распространение получили двухэтажные вагоны (Hi-Level, Superliner I, Superliner II (1991-1996 гг.)) [46]. В негофрированной обшивке боковой стены на уровне второго этажа вагона Superliner (рисунок 1.3) в качестве продольных и поперечных подкрепляющих элементов использованы корытные

профили, что характерно для большинства кузовов вагонов американского производства с негофрированным кузовом, выполненным из нержавеющей стали.



**Рисунок 1.3 – Несущая конструкция кузова вагона Superliner**

В городском сообщении США используются вагоны серий 2600, 3200 и другие, негофрированные боковые стены которых выполнены из нержавеющей стали. Подоконный пояс боковой стены имеет начальную погибь и может быть выполнен гофрированным. В качестве подкрепляющих элементов боковой стены также применяются корытные профили (рисунок 1.4) [47].



**Рисунок 1.4 – Панель боковой стены кузова вагона в стенде сварки**

В междугороднем сообщении США используются вагоны Amfleet (выпущенные в 1973-1983 гг.) с кузовом из нержавеющей стали. Боковые стены кузова имеют начальную погибь и выполнены в надоконном и подоконном поясе с гофрированной обшивкой (рисунок 1.5, а).

Одноэтажные спальные вагоны Viewliner (Viewliner I (1994 г.), Viewliner II (2012 г.)) (рисунок 1.5, б) выполнены с изогнутыми боковыми стенами, причем

подоконный пояс обшивки является гофрированным. На боковой стене располагается два пояса окон (верхний пояс предназначен для пассажиров верхних спальных полок). Вагон Viewliner блочно-модульного исполнения, в связи с этим его характерной чертой является наличие в боковой стене съемного люка.



а

б

*а) вагон для междугороднего сообщения Amfleet (Budd);*

*б) спальный вагон Viewliner II (CAF)*

**Рисунок 1.5 – Пассажирские вагоны США**

Канадская машиностроительная компания Bombardier Transportation в области производства железнодорожного подвижного состава сегодня реализует свои проекты во многих странах мира, среди которых Бельгия (реализация проекта - 1996-1997 гг.), Китай (2002 г.), Узбекистан (2000 г.), где производятся современные несамоходные пассажирские вагоны, выполненные с кузовом из нержавеющей стали и с негофрированной обшивкой боковых стен (рисунок 1.6, а, б) [48].



а

б

*а) вагон модели III с местами для сидения (Бельгия);*

*б) спальный вагон (Китай)*

**Рисунок 1.6 – Пассажирские вагоны Bombardier Transportation**

В Японии поезда дальнего следования постепенно вытесняются по мере распространения высокоскоростной сети Shinkansen. Находившийся в эксплуатации до 2008 года пассажирский одноэтажный спальный вагон модели ORoNe 25 901 (рисунок 1.7) имеет изогнутые боковые стены кузова с негофрированной обшивкой.



**Рисунок 1.7 – Пассажирский спальный вагон модели ORoNe 25 901 (Nippon Sharyo)**

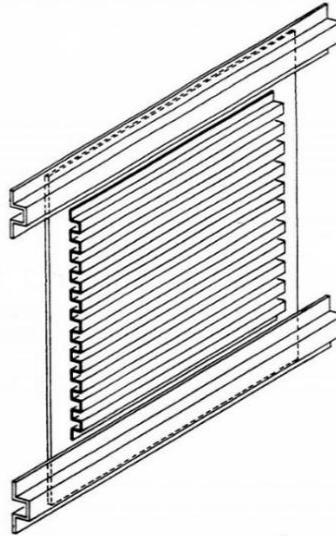
Во Франции в период с 1975 года по 1989 год были введены в эксплуатацию пассажирские вагоны серии Corail с негофрированной обшивкой боковых стен. На базе вагонов семейства Corail созданы пассажирские вагоны TéoZ, введенные в эксплуатацию с 2003 г. по 2006 г. (рисунок 1.8). Дизайн французского вагона Corail был взят за основу также португальскими и румынскими производителями подвижного состава.



**Рисунок 1.8 – Пассажирский вагон серии Corail (Alstom)**

Французской машиностроительной компанией Alstom запатентован кузов пассажирского вагона из нержавеющей стали с наружной негофрированной

обшивкой, подкрепленной с внутренней стороны кузова гофрированным листом (рисунок 1.9) [49].



**Рисунок 1.9 – Элемент обшивки, подкрепленной гофрированным листом с продольными подкрепляющими элементами кузова**

В эксплуатации также можно встретить пассажирские вагоны производства Alstom с негофрированными изогнутыми боковыми стенами с применением в несущей конструкции перфорированных балок (рисунок 1.10) [50].



*а*

*б*

*а) общий вид кузов вагона; б) вид кузова изнутри*

**Рисунок 1.10 – Кузов пассажирского вагона с элементами конструкции перфорированного сечения (Alstom)**

В скоростном сообщении федеральной железной дорогой Германии с 1954 года использовались пассажирские вагоны UIC-X (рисунок 1.11, а), стандартизованные Международным союзом железных дорог (UIC). Вагоны

аналогичной конструкции также использовались Австрийской федеральной железной дорогой (ÖBB) с 1957 года и с 1966 года Швейцарской федеральной железной дорогой (SBB). Вагон UIC-X имел плоские боковые стены с негофрированной обшивкой. На его основе были разработаны серии пассажирских вагонов, отличающиеся друг от друга в основном комфортабельностью и конструкцией крыши (рисунок 1.11, б).



а

б

а) вагон UIC-X; б) вагон модели Avmz

**Рисунок 1.11 – Пассажирские купейные вагоны Германии**

Пассажирские вагоны стандарта UIC разных типов сегодня эксплуатируются на железных дорогах Италии, Франции, Бельгии и других европейских стран.

Пассажирские вагоны дальнего следования производства Германии (рисунок 1.12) в конце 20 века поставлялись на отечественные железные дороги.

Кузова пассажирских вагонов производства Германии выполнены с гофрированной обшивкой боковых стен с цилиндрическими гофрами (исключение составляют вагоны габарита РИЦ модели ВЛАБ-200 производства 1994-1996 гг., выполненные с негофрированной обшивкой боковых стен, рисунок 1.12, б). Характерной особенностью кузовов с гофрированной обшивкой боковых стен производства Германии является наличие двух гофров на межконном и подоконном поясах обшивки.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что пассажирские вагоны зарубежного производства преимущественно имеют цельнометаллический несущий кузов, причем наиболее распространены кузова с негофрированной наружной обшивкой боковых стен.



а

б

а) купейный вагон; б) спальный вагон РИЦ ВЛАБ-200

**Рисунок 1.12 – Пассажирские вагоны производства Германии**

Как правило, подкрепление негофрированной обшивки осуществляется гнутыми подкрепляющими элементами и гофрированной обшивкой. Производители пассажирских вагонов (Bombardier Transportation, Alstom и др.) в конструкции кузовов несамоходных вагонов преимущественно используют легированные и нержавеющие стали.

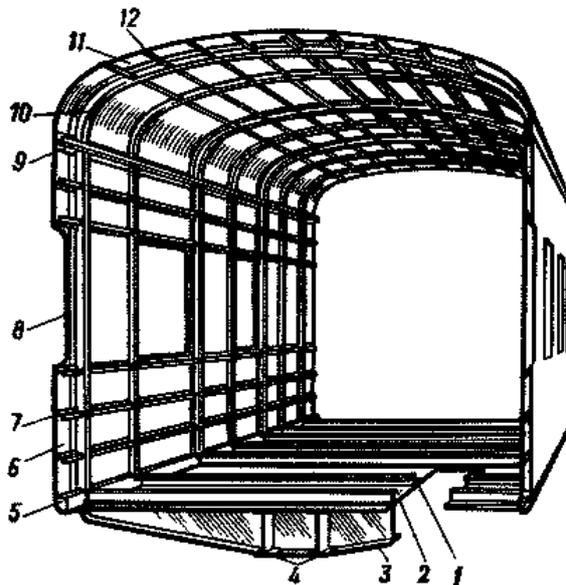
### **1.2.2 Обзор конструкций боковых стен пассажирских вагонов отечественного производства**

В 20 веке отечественное производство пассажирских вагонов было сосредоточено на Калининском и Ленинградском вагоностроительных заводах.

С 1934 года, со строительства на Калининском вагоностроительном заводе опытного пассажирского вагона с цельнонесущим металлическим кузовом, начался период развития отечественных цельнометаллических пассажирских вагонов локомотивной тяги. Стены, крыша и рама вагона имели стальной каркас и стальную обшивку. Все вместе элементы составляли единое целое и совместно воспринимали все основные нагрузки вагона. За основу была принята конструкция вагона, разработанная Центральным вагонным конструкторским бюро под руководством инженера П.И. Травина [51].

Массовое производство цельнометаллических пассажирских вагонов было запущено в 1946 г. Геометрические размеры пассажирских вагонов всех типов стали унифицированы. Ширина кузова составляла 3,1 м, а длина – 23,6 м (по осям сцепления автосцепок – 24,5 м), база – 17 м.

При строительстве цельнометаллических вагонов использовался не только накопленный опыт в этой области, но опыт самолето- и судостроения. Кузов вагона первого выпуска был выполнен в виде трубы, в которой все части конструкции связывались между собой, образуя тонкостенную оболочку (рисунок 1.13).



- 1 – балка пола; 2 – обшивка пола; 3 – промежуточная поперечная балка рамы;  
 4 – хребтовая балка; 5 – нижняя обвязка; 6 – обшивка боковой стены;  
 7 – стрингер боковой стены; 8 – стойка; 9 – верхняя обвязка; 10 – дуга крыши;  
 11 – обшивка крыши; 12 – стрингер крыши

**Рисунок 1.13 – Цельнонесущий кузов вагона некупейного типа**

Поперечное сечение оболочки представляло собой прямоугольник с закругленными углами. Металлическая обшивка кузова, подкрепленная продольными (стрингерами) и поперечными (шпангоутами) элементами жесткости выступала основным несущим элементом. Толщина анодированных листов обшивки для рамы и торцевых стен составляла 3 мм, для крыши – 2 мм.

С 1950 г. в качестве продольных элементов жесткости стали использовать гофры, что позволило уменьшить объем сварочных работ и коробление обшивки.

Применение гофров и в дальнейшем применение низколегированной стали (09Г2Д, 10ХНДП) позволило уменьшить толщину обшивки.

Так, в кузове вагона типа ЦМВО-66 (цельнометаллический вагон открытый, 1966 г., модель 61-181) из углеродистой стали боковые стены имели толщину гофрированной обшивки 2,5 мм, за исключением надоконного пояса обшивки. В надоконном поясе, торцевых стенах и средней части крыши толщина обшивки составляла 1,5 мм. Неогофрированная обшивка консольных частей рамы – 3 мм. Обшивка скатов крыши и средней части рамы была реализована толщиной 2 мм. Рама кузова вагона изготовлялась со сквозной хребтовой балкой, либо в средней части хребтовая балка отсутствовала, что позволяло снизить массу кузова [52].

Помимо отечественного пассажирского подвижного состава в СССР эксплуатировались цельнометаллические пассажирские вагоны постройки Германии, Венгрии и Польши построенные в период 1948 – 1987 гг., также имевшие гофрированную обшивку боковых стен.

Типовой конструкцией отечественных пассажирских вагонов с 1981 года является конструкция вагона модели 61-821 (рисунок 1.14) с цельнометаллическим кузовом, построенным на основе ЦМВО-66, с применением низколегированной стали.



**Рисунок 1.14 – Пассажирский вагон некупейного типа модели 61-821**

Рама кузова вагона выполнена со сквозной хребтовой балкой, двумя шкворневыми, двумя концевыми и тремя поперечными балками, имеются также

вспомогательные балки для крепления оборудования. Настил пола в средней части выполнен гофрированным. Торцевые стены впервые выполнены с гофрированной обшивкой. Обшивка крыши в средней части гофрированная, с продольным расположением гофров. В скатах крыши использована негофрированная обшивка.

Каркас боковой стены кузова состоит из вертикальных стоек зетового профиля (55x65x40x3 мм) и продольных верхней и нижней обвязок зетового профиля (размером соответственно 70x50x20x3 мм и 100x75x65x3 мм), перекрытого гофрированным листом. Толщина обшивки боковой стены в надоконном поясе – 2 мм, в других поясах – 2,5 мм. Шаг круглых гофров обшивки в подоконном поясе составляет 125 мм. В отличие от кузова ЦМВО-66 в боковой стене отсутствует окно в котельном отделении.

В конструкции кузова использована низколегированная сталь 09Г2Д (рама), углеродистая сталь 20кп (стойки стен и дуги крыши), углеродистая сталь 15кп (обшивка кузова и настил пола) и сталь ВСт3кп.

Уже в 1989 году Калининским вагоностроительным заводом был построен первый опытный вагон межобластного сообщения модели 61-838 с конструкционной скоростью 200 км/ч, кузов которого был изготовлен из нержавеющей стали 10Х13Г18Д (ДИ-2). Кузов конструировался с увеличенной длиной, которая составляла 26,87 м [53].

С 1991 года в вагонах серийного производства Калининского вагоностроительного завода стали использовать нержавеющую сталь. В вагоне некупейного типа модели 61-836 из нержавеющей стали 12Х13Г18Д (ДИ-61) была выполнена обшивка подоконного пояса боковой стены, толщина которой составляла 1,5 мм. Остальная часть обшивки выполнялась из низколегированной стали 10ХНДП. Надоконный пояс обшивки и крыша выполнялись толщиной 2 мм, а межоконный пояс – 2,5 мм. Толщина настила пола – 1,5 мм. Вершины гофров обшивки боковых стен имели 3 радиусных участка. Толщина стоек из зетовых профилей уменьшилась до 2 мм в сравнении со стойками кузова вагона модели 61-821. Выполнена замена нижней обвязки на специальный профиль толщиной 5 мм.

Калининский вагоностроительный завод являлся основным производителем отечественных пассажирских вагонов и продолжил свою работу в постсоветской России в качестве Тверского вагоностроительного завода (ТВЗ), разрабатывая поколение пассажирских вагонов дальнего следования для скоростей движения до 160 км/ч, имеющих универсальную конструкцию кузова.

На основе кузовов предшествующих моделей в период с 1993 года по 1998 год был освоен выпуск вагонов купейного типа (61-820, 61-820К, 61-4179), открытого типа с креслами для сидения (61-4178) и вагонов некупейного типа (61-4177).

Кузов вагона модели 61-4179 выполнен с традиционной гофрированной обшивкой с круглыми гофрами (рисунок 1.15).



**Рисунок 1.15 – Пассажирский вагон купейного типа модели 61-4179**

В раме кузова применены новые профили: средняя часть хребтовой балки выполнена из двутавра №30Б2, в роли обвязок рамы применен уголок толщиной 8 мм, в качестве поперечных балок рамы использованы гнутые швеллеры толщинами 4 мм и 6 мм, а также корытные профили толщиной 3 мм. В средней части кузова рама перекрыта гофрированным листом толщиной 2 мм, круглые гофры расположены с шагом 125 мм, их высота составляет 23 мм. Концевые части рамы перекрыты негофрированным листом из нержавеющей стали толщиной 3 мм.

Каркас боковых стен выполнен из стоек и верхней обвязки аналогично модели вагона 61-821. Гофрированная обшивка стен в подоконном поясе имеет шесть круглых гофров, подобных гофрам кузова вагона модели 61-836, и подоконный гофр, межоконный простенок имеет 3 гофра, расположенные с шагом 250 мм, по

ширине надоконного пояса боковой стены располагается 3 круглых гофра с шагом 120 мм, и надоконный гофр. Шаг гофров обшивки торцевых стен составляет 250 мм.

Обшивка крыши в средней части гофрированная и имеет 12 гофров, расположенных с шагом 250 мм (шаг между верхними гофрами – 90 мм). Скат крыши негофрированный. Дуги выполнены из зетового профиля толщиной 2,5 мм, обвязки из уголкового профиля толщиной 3 мм. Толщина обшивки стен и крыши составляет 2 мм. Гофры торцевых стен, пола, крыши и верхнего пояса боковых стен типовые.

С увеличением скоростей движения пред ТВЗ стала новая задача по разработке кузовов пассажирских вагонов с негофрированной обшивкой, обеспечивающей лучшие аэродинамические характеристики вагона, а также позволяющей увеличить внутреннее пространство салона. Данную группу вагонов составляют пассажирские вагоны нового поколения с конструкционной скоростью 160/200 км/ч, длина по осям сцепления автосцепок составляет 25,5 м.

Одним из вагонов данного типа, кузов которого имеет наружную негофрированную обшивку боковых стен, является купейный вагон с креслами для сидения модели 61-4170 (рисунок 1.16), выпуск которого был освоен в 1998 г. Из вагонов этой модели сформированы скоростные поезда «Невский экспресс» (2001 г.), «Буревестник» (2004 г.), «Красная стрела» (2005 г.)



**Рисунок 1.16 – Пассажирский вагон с креслами для сидения модели 61-4170**

Отличительными особенностями конструкции кузова рассматриваемого вагона являются: хребтовая балка рамы, состоящая из двух швеллеров (в концевой части – швеллер №30, в средней – швеллер №14П), усиленная продольно

расположенными швеллерами концевая часть рамы, гофрированный настил пола с трапециевидными гофрами, негофрированная обшивка боковых и торцевых стен, гофрированная обшивка средней части крыши, выполненные толщиной 1,5 мм.

При этом обшивка боковых стен выполнена двухслойной, состоящей из наружного негофрированного листа толщиной 1,5 мм, подкрепленного гофрированными панелями с трапециевидными гофрами толщиной 1 мм. В отличие от всей боковой стены в межоконном простенке гофры имеют вертикальную ориентацию. Соединение обшивок между собой выполнено точечной сваркой. Каркас боковой стены выполнен из гнутых зетобразных и корытообразных в местах поддомкрачивания кузова стоек, надоконных и подоконных профилей в виде гнутых уголков, а также верхней обвязки в виде гнутого профиля.

Кузов вагона изготовлен из нержавеющей хромоникелевой стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5582, исключение составляют балки рамы, выполненные из низколегированной стали 09ГД2 по ГОСТ 19281. Крыша выполнена из углеродистой стали 4-Ш-15КП по ГОСТ 16523.

С 2008 года на ТВЗ начался выпуск нового модельного ряда пассажирских вагонов с новым кузовом из нержавеющей стали с плоскогофрированной обшивкой. К ним относятся вагоны моделей: 61-4440 (купейный и спальный вагон повышенной комфортности) – рисунок 1.17, 61-4445 (купейный штабной), 61-4447 (некупейный), 61-4458 (с местами для сидения), 61-4460 (вагон-ресторан), 61-4462 (купейный, постоянного формирования), 61-4463 (купейный штабной), 61-4464 (вагон-ресторан).



**Рисунок 1.17 – Пассажирский купейный вагон модели 61-4440**

Кузова вагонов нового модельного ряда имеют комбинированную обшивку боковых стен. Подоконный пояс обшивки боковой стены выполнен однослойным с гофрированной обшивкой с трапециевидными гофрами, межоконный и надоконный пояс обшивки боковой стены двухслойные – наружная обшивка негофрированная, внутренняя – гофрированная с трапециевидными гофрами. Обшивки соединены между собой контактной точечной сваркой.

С 2009 года началось активное сотрудничество ТВЗ с ведущим зарубежным производителем железнодорожной техники – компанией Siemens по созданию вагонов габарита RIC модели 61-4476 (рисунок 1.18), предназначенных для международного сообщения. Боковые стены вагонов данного типа выполнены с негофрированной обшивкой боковых стен, подкрепленной облегченными профилями.



**Рисунок 1.18 – Пассажирский спальный вагон для международных сообщений типа RIC модели 61-4476**

В 2009 году заводом также освоен выпуск нового вида подвижного состава для России – двухэтажных вагонов (модели: 61-4473 (вагон-ресторан), 61-4472 (купейный штабной), 61-4465 (купейный), 61-4492 (с местами для сидения), 61-4503 (штабной с местами для сидения). Подкрепление негофрированной обшивки боковых стен двухэтажных вагонов выполнено продольными подкрепляющими элементами зетового профиля и двухслойной обшивкой. Сегодня изготавливаются кузова двухэтажных пассажирских вагонов также с перфорированными подкрепляющими элементами (рисунок 1.19).



**Рисунок 1.19 – Фрагмент боковой стены двухэтажного пассажирского вагона в стенде сборки**

На сегодняшний момент ОАО «ТВЗ» является крупнейшим предприятием в России по производству магистральных пассажирских вагонов разных типов и монополистом на российском рынке пассажирских вагонов локомотивной тяги (более 90%) [54].

Кузова несамоходных пассажирских вагонов отечественного производства основных типов по конструкции и размерам являются унифицированными. Главным конструктивным отличием рам пассажирских вагонов является отсутствие или наличие сквозной хребтовой балки. Крыши, в свою очередь, выполняются изогнутыми и могут отличаться друг от друга радиусами средней части и скатов крыши. Обшивка крыши и торцевых стен выполняется негофрированной и гофрированной с круглыми гофрами, обшивка боковых стен – негофрированной, гофрированной либо сочетанием негофрированной и гофрированной обшивок.

Проведенный обзор существующих несущих конструкций боковых стен кузовов несамоходных пассажирских вагонов отечественного и зарубежного производства показал устойчивую тенденцию применения конструкций с негофрированной наружной обшивкой, что обусловлено требованиями рынка по эстетическому внешнему виду вагонов, упрощению технологии нанесения лакокрасочных покрытий, увеличению коррозионной стойкости кузова и

улучшению аэродинамических показателей вагона. При этом анализ конструктивных решений, обеспечивающих устойчивость негофрированной плоской обшивки, показал, что современные производители подвижного состава склонны к применению стрингерных вариантов подкрепления. При этом применение изогнутых боковых стен не является традиционным для отечественных пассажирских вагонов и приведет к сложности в изготовлении в связи с изменением технологии производства кузова, а также уменьшит объем полезного пространства вагона при его вписывании в габарит подвижного состава.

Применение облегченных профилей, в частности перфорированных, подкрепляющих негофрированную несущую обшивку кузова пассажирского вагона является одним из перспективных направлений в области облегчения несущей конструкции кузова вагона. Поскольку вагонные конструкции эксплуатируются при интенсивном воздействии знакопеременных изменяемых во времени нагрузок, в их несущих конструкциях применяются круглые и продолговатые типы перфорации.

Применение облегченных несущих конструкций боковых стен пассажирских вагонов с негофрированной наружной обшивкой свидетельствует о необходимости разработки технических решений, обеспечивающих прочность кузова вагона, жесткость, усталостную долговечность и устойчивость сжатых элементов конструкции.

Вопросам совершенствования вагонных конструкций посвящено большое количество работ ведущих российских и зарубежных ученых.

### **1.3 Обзор методов прочностных исследований**

Научную основу проектирование отечественного пассажирского вагона получило в 19 веке. Под руководством профессора Н.Л. Щукина инженеры рассчитывали все основные части вагона. Появилась специальная литература по вагоностроению.

Прочностным исследованиям, а также совершенствованию вагонных конструкций в 19 веке посвящены работы С.Р. Дадыко [55], первого заведующего кафедрой «Вагоны» РУТ(МИИТ). Значительный вклад в обеспечение прочности вагонов также внесли М.М. Стемпневский, З.О. Каракашьян, А.И. Михалевский [56], А.А. Попов [57].

Современные методы расчета на прочность цельнонесущих кузовов вагонов основываются на исследованиях В.З. Власова (РУТ (МИИТ)), сформулировавшего в середине 20 века общую теорию оболочек и тонкостенных стержней с недеформируемым контуром поперечного сечения [58,59]. На основе полученных результатов исследований Е.Н. Никольский, основатель научной школы БГТУ (БИТМ), разработал итерационные методы расчета несущих конструкций кузовов вагонов типа подкрепленной оболочки – метод чередования основных систем и обобщенный метод сил, позволяющие получить уточненные результаты расчета напряженно-деформированного состояния кузова вагона путем последовательного рассмотрения упрощенных расчетных схем [60].

Для проведения уточненного расчета расчетная схема кузова пассажирского вагона может представляться плоской, в виде стержневой системы. В данной системе простенки между надоконным и подоконным поясами изображаются в виде стоек с абсолютно жесткими крайними участками. Возникающие в контуре напряжения соответствуют срединным напряжениям в обшивке и продольных подкрепляющих элементах. В основе расчета лежит теория оболочек с неизгибаемым контуром.

С учетом того, что кузов пассажирского вагона представляет собой прежде всего оболочечную структуру, а не стержневую, точный расчет кузова вагона основывается на более строгих положениях теории упругости. В связи с чем в дальнейшем развитие нашли пластинчато-стержневые пространственные расчетные схемы [61]. В этом случае подоконная часть поперечного сечения кузова будет представлять собой П-образную оболочку, состоящую из пластин и продольных стержней, а надоконная часть – криволинейную цилиндрическую оболочку. Расчет оболочки аналитически выполняется методом П.Ф. Папковича [62], согласно

которому находятся силы взаимодействия пластинок и стержней, после чего пластинки рассчитываются в тригонометрических рядах (решение Файлона).

Значительный вклад в развитие теории оболочек внесли труды таких советских ученых как В.В. Новожилова [63], А.Л. Гольденвейзера [64], Х.М. Муштари и К.З. Галимова [65], А.С. Вольмира [66] и др.

Наряду с аналитическими методами расчета вагонных конструкций применяются экспериментальные методы. Экспериментальные натурные методы исследования прочности вагона позволяют получить фактические данные о напряженно-деформированном состоянии как отдельных элементов и узлов, так и кузова в целом. Посредством экспериментальных методов чаще всего осуществляется подтверждение прочностных характеристик разработанного кузова вагона, а также верификация результатов теоретических расчетов.

Оценка прочности кузова вагона экспериментальным методом выполняется тензометрированием или оптическими измерениями. Наибольшее распространение получил метод тензометрирования, использующий тензометрические датчики, наклеиваемые на исследуемые области конструкции. С датчиков информация о деформациях подается на программно-аппаратные комплексы для обработки.

Натурные испытания могут проводиться в специальных стендах, воспроизводящих нагрузки эквивалентные эксплуатационным, либо на полигоне с воспроизведением условий эксплуатации в соответствии с ГОСТ 34093.

Большой вклад в совершенствование кузовов пассажирских вагонов, а также развитие аналитических и экспериментальных методов оценки их прочности и динамической нагруженности внесли исследования ученых НО ТИВ (КФ ВНИИВ) – А.А. Юхневского, С.Л. Самошкина, Е.В. Афанасьева, В.М. Мейстера, П.С. Ломакова, А.Н. Скачкова, В.В. Василевского, А.А. Хоменко, С.Д. Коршунова, Д.И. Гончарова [2-10] и др.

С шестидесятих годов 20 века благодаря развитию электронно-вычислительных машин на ряду с аналитическими и экспериментальными методами исследования напряженно-деформированного состояния тонкостенных

оболочечных конструкций массовое применение получили численные методы. Наиболее популярным численным методом инженерного анализа является метод конечных элементов (МКЭ), основанный на дискретизации исследуемой конструкции на конечное множество элементов и кусочно-элементной аппроксимации исследуемых функций.

Развитие МКЭ в значительной степени обязано исследованиям ученых по проектированию аэрокосмической техники. Следует отметить работы И. Аргириса, С. Келси [67] и М. Тернера, Р. Клауфа, Г. Мартина, Л. Топпа [68], в исследованиях которых были объединены подходы расчета фермовых конструкций и сплошных сред с использованием матричной формы записи. МКЭ прошел ряд непрерывных модификаций. Отечественными исследователями, внесшими вклад в развитие МКЭ, являются такие ученые как Л.А. Розин [69,70], Л.А. Оганесян [71], В.Г. Корнеев [72], В.А. Постнов [73], А.С. Сахаров [74], С.Ю. Еременко [75], И.Н. Молчанов, Л.Д. Николаенко [76], И.Ф. Образцов и его команда [77].

МКЭ является универсальным методом широкого спектра видов расчетов конструкций, позволяющим производить расчет единым способом. Широкое применение метод нашел для исследований механики деформируемого твердого тела.

Сегодня существует большое количество программных продуктов, реализующих при расчетах МКЭ. Программы конечноэлементного анализа могут быть встраиваемыми на уровне меню в известные системы автоматизированного проектирования, что позволяет производить быстрый расчет конструкции в среде ее разработки (Cosmos/Works, DesignSpace, MSC/InCheck, MSC.visualNastran Desktop 4D). Или могут быть независимыми с максимальными возможностями моделирования и способными производить расчет геометрически сложных конструкций с учетом характера приложения нагрузок и граничных условий. К данной группе программных продуктов относятся пакеты программ SCAD, ANSYS, FEMAP с решателем NX Nastran, CATIA, NX Advanced Simulation.

Вопросам исследования напряженно-деформированного состояния и совершенствования конструкций кузовов вагонов, в том числе с применением

МКЭ, посвящены работы ученых РУТ (МИИТ): Л.А. Шадура [52,53], В.Н. Котуранова [78], Г.И. Петрова [79,80], В.Н. Филиппова [81], Н.Н. Воронина [82], С.В. Беспалько [83], М.Н. Овечникова [84], П.Г. Проскурнева [85], А.П. Азовского [86], М.П. Козлова [87] и др. Котуранов В.Н. является основателем научной школы МИИТа – «Механика вагонов». Исследования ученых школы берут свое начало с оценки прочности котлов вагонов-цистерн. Исследованиям динамики вагона посвящены труды С.В. Вершинского [56, 61].

Значительный вклад в развитие исследований оптимизации и рационализации кузовов с учетом прочности, устойчивости и усталостной долговечности несущих элементов преимущественно пассажирских вагонов, разработку их конечноэлементных расчетных схем внесли ученые БГТУ (БИТМ) – В.В. Кобищанов, Д.Я. Антипин [11-13], В.П. Лозбинец, Ф.Ю. Лозбинец, И.Н. Серпик, А.А. Ольшевский, М.В. Боборов, А.А. Милакова, В.В. Сеницын [88-94], Д.Ю. Погорелов [95-97] и др.

Исследованиям в области прочности, надежности и совершенствования несущих конструкций и динамических характеристик подвижного состава посвящены труды ученых ряда научных организаций: ПГУПС (ЛИИЖТ): Ю.П. Бороненко, А.В. Третьякова, А.А. Битюцкого, Н.А. Битюцкого, М.М. Соколова, А.М. Орловой [14, 98-102] и др.; ВНИИЖТ: Ю.М. Черкашина, Ю.С. Романа, А.М. Соколова, А.М. Краснобаева, С.С. Барбарича [15-17] и др.; ВНИКТИ: Э.С. Оганьяна, Г.М. Волохова [103,104] и др.; БелГУТ: А.В. Пигунова [18] и др.; УрГУПС (УЭМИИТ): Н.С. Бачурина, К.М. Колясова, В.Ф. Лапшина, А.В. Смольянинова, Т.В. Ивашовой, А.Э. Павлюкова [19, 105-108] и др.; ИрГУПС (ИрИИТ): Л.Б. Цвика [109] и др.; ДНУЖТ (ДИИТ) – В.М. Бубнова, С.В. Мямлина, В.А. Лазаряна, Е.П. Блохина [110-113] и др.; КВСЗ: В.И. Приходько, О.А. Шкаброва [20,21] и др.; РГУПС (РИИЖТ): О.А. Ворон [114] и др.; СамГУПС (КИИТ): А.Н. Балалева, Т.В. Лисевич [115,116] и др.; ИЦВС; НИИВ, ЦКБ ТМ, ПКТЬ Л (ПКБ ЦЛ – филиал ОАО «РЖД»), НВЦ «Вагоны» и других организаций.

В области исследования прочности и безопасности несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов среди зарубежных ученых можно отметить работы

C. Baykasoglu, T. Toprak, A. Mugan [22, 23], S.W. Kirkpatrick, J.W. Simons [24], M. Bingrong [25], F. Sui [26], J. König, J. Winter, M. Schön [27], D. Wennberg [117] и др.

Подход в области облегчения несущих конструкций с использованием перфорированных подкрепляющих элементов только в последнее время стал внедряться в пассажирском вагоностроении. На данный момент прочностные расчеты балок перфорированного сечения получили развитие в области строительства, а также авиа- и судостроения [28,118,119]. В работах отечественных и зарубежных авторов приведены эмпирические и приближенные аналитические зависимости оценки уровня напряжений, устойчивости и жесткости перфорированных балок [29-40]. Как правило, в работах исследование перфорированных балок выполнено методом конечных элементов.

На современном этапе развития методов прочностных расчетов вагонных конструкций не существует четкой методики оценки несущей способности кузова пассажирского вагона, выполненного с перфорированными подкрепляющими элементами, а также определения рационального типа и параметров перфорации подкрепляющих обшивку элементов. Зоны перфорации являются концентраторами напряжений и трудно поддаются расчетной оценке. Поэтому в качестве основного метода для проведения исследования целесообразно использовать компьютерное математическое моделирование.

#### **1.4 Выводы по разделу 1**

Анализ мирового опыта проектирования кузовов пассажирских вагонов показал, что в российских условиях наиболее применимыми являются цельнонесущие кузова, выполненные из конструкционных сталей. При этом наблюдается широкое использование конструкций с негофрированной наружной обшивкой. Данное конструктивное решение позволяет упростить технологию нанесения лакокрасочных покрытий, повысить коррозионную стойкость кузова и улучшить аэродинамические показатели вагона. Современные производители

пассажирского подвижного состава склонны к использованию стрингерных вариантов подкрепления обшивки. Перспективным направлением в области облегчения несущей конструкции кузова является применения перфорированных подкрепляющих элементов, но вместе с тем четкой методики обоснования выбора типа и параметров перфорации подкрепляющих элементов не существует.

**Цель исследования.** Разработать и научно обосновать проектные решения по рационализации несущей конструкции кузова пассажирского вагона с негофрированной обшивкой боковых стен с применением перфорированных элементов.

**Достижение указанной цели связано с необходимостью решения следующих задач.**

1 Разработана методика обоснования выбора типа и параметров перфорации элементов подкрепляющего набора кузова пассажирского вагона.

2 Разработана и верифицирована проблемно-ориентированная конечноэлементная расчетная модель несущей конструкции кузова пассажирского вагона.

3 Определены варианты несущей конструкции боковой стены кузова пассажирского вагона с перфорированными подкрепляющими элементами;

4 Разработаны и верифицированы конечноэлементные расчетные модели несущей конструкции кузова пассажирского вагона с перфорированными подкрепляющими элементами.

5 Разработана и верифицирована динамическая модель пассажирского вагона и на ее основе выполнена оценка нагруженности кузовов пассажирских вагонов с перфорированными подкрепляющим элементами.

6 Оценена эффективность и соответствие требованиям нормативной документации предлагаемых конструктивных решений несущей конструкции кузова пассажирского вагона.

**Принятые допущения и ограничения.**

1 Оценка напряженно-деформированного состояния кузова вагона выполнена с использованием проблемно-ориентированной пластинчатой конечноэлементной модели.

2 Верификация расчетной модели кузова вагона произведена на основании результатов статических натурных стендовых испытаний.

3 Создание конечноэлементных расчетных моделей несущей конструкции кузова пассажирского вагона с перфорированным подкрепляющим набором дополнительно выполнено методом суперэлементного редуцирования конструкции.

4 Верификация данных о местном напряженно-деформированном состоянии перфорированных подкрепляющих элементов конструкции произведена на основании результатов статических стендовых испытаний тестовых образцов профилей.

5 Оценка динамического нагружения несущей конструкции кузова пассажирского вагона осуществлялась с использованием гибридной модели.

6 Верификация динамической расчетной модели пассажирского вагона производилась на основании результатов натурных поездных испытаний.

## 2 РАЗРАБОТКА ДЕТАЛИЗИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ КУЗОВА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА

### 2.1 Описание объекта исследования

В качестве объекта исследования принята несущая конструкция кузова отечественного пассажирского вагона модели 61-4447 производства ОАО «ТВЗ». Вагон данного типа производится серийно с 2009 г. и является одним из наиболее востребованных типов пассажирского подвижного состава дальнего следования железных дорог России.

Пассажирский вагон некупейного типа модели 61-4447 (рисунок 2.1) предназначен для перевозки пассажиров (пассажировместимость 54 человека) на участках железных дорог колеи 1520 мм с длительностью пребывания в пути более 8 часов. Конструкционная скорость вагона составляет 160 км/ч. Масса тары неэкипированного вагона из углеродистых сталей – не более 56,6 т. Подробные технические характеристики вагона представлены на сайте производителя [120].



**Рисунок 2.1 – Пассажирский некупейный вагон модели 61-4447**

Цельнометаллическая несущая конструкция кузова пассажирского вагона представляет собой замкнутую, подкрепленную продольными и поперечными элементами жесткости, оболочку с вырезами для окон, дверей и люков.

Рама кузова вагона образована продольными и поперечными балками. Хребтовая балка сквозная, выполняется переменного сечения и состоит в консольных частях из двух швеллеров №30В ГОСТ 5267.1, а в средней части из двутавра №30Б2 СТО АСЧМ 20. В качестве продольных обвязок рамы использован уголок №10 ГОСТ 8509. Поперечные балки рамы включают в себя концевые, шкворневые и промежуточные балки. Концевые балки рамы выполнены из такого же профиля, как и консольные части хребтовой балки. Переменное коробчатое сечение имеют шкворневые балки. Толщина горизонтальных листов балки составляет 8 мм, вертикальных – 6 мм. Набор поперечных промежуточных балок рамы состоит из гнутых швеллеров и корытных профилей, толщиной 4 мм и 3 мм соответственно. В концевой части рамы используются вспомогательные продольные и поперечные балки, выполненные из швеллера №14П ГОСТ 8240. В местах перехода профилей хребтовой балки установлены промежуточные поперечные балки переменного сечения (гнутые равнополочные швеллеры с толщиной полки 6 мм). Также на раме предусмотрены элементы для крепления подвагонного оборудования. В качестве настила пола в средней части рамы использован гофрированный лист с круглыми гофрами (профиль 1085×45×21×1,5 мм), в консольной части рамы – негофрированный лист толщиной 4 мм.

Несущая способность боковой стены обеспечивается за счет комбинированной обшивки. Наружная обшивка боковой стены состоит из трех поясов: нижнего (подоконный), среднего (межоконный) и верхнего (надоконный). Нижний пояс является однослойным и выполнен из гофрированного листа с трапециевидными гофрами (профиль 891×14×2,0 EN 10259-2,0). На ширине пояса располагается 4 гофра с шагом 215 мм. Средний и верхний пояса выполнены двухслойными с негофрированной наружной обшивкой (толщиной 1,5 мм), подкрепленной гофрированной с трапециевидными гофрами (профиль 230×16×1,0 мм). По ширине среднего пояса располагается 8 гофров с шагом 120 мм. На верхнем поясе внутренней обшивки по ширине располагается 2 гофра. Соединение обшивок между собой осуществляется контактной точечной сваркой. Пояса обшивки боковой стены соединены между собой двумя продольными

сварными швами нахлесточным соединением по всей длине боковой стены. Подкрепляющий каркас боковой стены включает в себя верхнюю обвязку (гнутой зетовый профиль -  $75 \times 30 \times 20 \times 2,5$  мм), стойки, в том числе дверные (неравнополочный уголок №11/7), а также горизонтальные и вертикальные гнутые профили (уголок и швеллер), подкрепляющие оконные проемы. Гнутый зетовый профиль ( $55 \times 55 \times 35 \times 2,5$  мм) использован в качестве основных стоек боковой стены, в местах установки домкратов в боковой стене предусмотрены стойки из гнутых корытных профилей с толщиной полки 2,5 мм.

Торцевые стены выполнены с негофрированной наружной обшивкой. В качестве подкрепляющих элементов выступают вертикальные и горизонтальные Z – образные ребра, поперечная балка – неравнополочный уголок №10/6,3 и придверные стойки корытообразного сечения.

Несущая конструкция крыши вагона состоит из каркаса, обшивки, гофрированной в средней части (профиль  $1360 \times 21 \times 1,5$  мм), и негофрированной на скатах (лист EN 10259-2,0). Каркас выполнен из продольных обвязок, в качестве которых выступает гнутый уголковый профиль, и дуг, которые выполнены из гнутого зетового профиля ( $40 \times 65 \times 45 \times 2,5$  мм). Отверстия и люки в крыше подкреплены укороченными продольными балками.

Из коррозионно-инертной стали EN 10088-2-X6CrNiTi18-10 изготовлены основные несущие элементы конструкции: обшивка, стойки боковых стен, дуги крыши вагона, а также негофрированный настил пола. Возможно использование нержавеющей стали 08X18H10T или стали 12X18H10T по ГОСТ 5582. Другие элементы несущей конструкции изготовлены из конструкционной углеродистой стали (сталь 15пс) по ГОСТ 1050 и ГОСТ 380, рама кузова – из низколегированной стали (09Г2С, 09Г2СД) по ГОСТ 19281.

Внутреннее оборудование вагона включает следующие основные системы: систему электроснабжения; установку кондиционирования воздуха; систему отопления; систему водоснабжения; систему экологически чистых туалетов; систему накопления и передачи диагностической информации.

Вагон оборудован автосцепным устройством, размещенным на раме вагона (автосцепка типа СА-3, поглощающий аппарат типа Р-5П).

На торцевой стене вагона установлены переходные площадки с резиновым ограждением баллонного типа и переходными фартуками. На концевой балке рамы размещаются буферные комплекты. Расстояние между буферами 1782 мм.

Вагон оборудован тележками безлючного типа моделей 68-4095 и 68-4096 с дисковым тормозом.

## **2.2 Требования к несущим конструкциям кузовов пассажирских вагонов**

Опыт проектирования и эксплуатации пассажирских вагонов показал, что несущая конструкция кузова должна удовлетворять ряду исходных технических требований, обеспечивающих безопасность движения, перспективные условия эксплуатации, работоспособность и надежность данного типа вагона в течение всего срока службы.

Для решения задачи по выбору рационального конструктивного исполнения несущей конструкции кузова пассажирского вагона были определены критерии, удовлетворяющие исходным техническим требованиям. В работе рассмотрены критерии, рекомендуемые нормативной документацией.

В качестве параметров выбора рациональной несущей конструкции кузова пассажирского вагона определены пять основных критериев:

- масса несущей конструкции;
- прочность;
- устойчивость сжатых элементов кузова пассажирского вагона;
- частота собственных изгибных колебаний;
- усталостная долговечность.

Масса сложной металлической конструкции, которую из себя представляет кузов пассажирского вагона, определяется суммой масс всех компонентов несущей конструкции кузова.

Прочность конструкции оценивается по эквивалентным напряжениям, которые не должны превышать допускаемых значений в условиях заданного расчетного режима в соответствии с технической документацией. Для практических расчетов эквивалентные напряжения определяются по четвертой энергетической теории прочности (теория Губера-Мизеса-Генки) [121], в соответствии с которой причиной возникновения опасной пластической деформации конструкции является потенциальная энергия изменения формы. Прочность обеспечена, если потенциальная энергия формоизменения при сложном напряженном состоянии не превышает значение допускаемой потенциальной энергии изменения формы для простого случая растяжения:

$$J_{\phi} \leq [J_{\phi}]. \quad (2.1)$$

После преобразования выражений энергии через напряжения, условие прочности в общем случае примет вид:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \leq [\sigma], \quad (2.2)$$

$$\sigma_{\text{экв}} \leq [\sigma], \quad (2.3)$$

где  $\sigma_{\text{экв}}$  - эквивалентные напряжения;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  - максимальные напряжения по осям координат  $x, y, z$ ;

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  - касательные напряжения в соответствующих плоскостях  $xy, yz, zx$ .

Допускаемые значения напряжений  $[\sigma]$  обуславливаются материалом конструкции и характером приложения нагрузки. Для пластичных материалов допускаемое напряжение равно пределу текучести материала.

Методом исследования устойчивости является энергетический метод, опирающийся на зависимости изменения полной потенциальной энергии системы при отклонении ее от положения равновесия. Согласно теореме Лагранжа, положение системы является устойчивым, если ее потенциальная энергия минимальна [122]. К выходу из устойчивого состояния системы приводят критические нагрузки. Устойчивость конструкции оценивается по расчетному коэффициенту запаса устойчивости, который сравнивается с допускаемым:

$$n_y = \frac{\sigma_{кр}}{\sigma} \geq [n_y] , \quad (2.4)$$

где  $\sigma_{кр}$  – критическое напряжение сжатия;

$\sigma$  – расчетное напряжение сжатия;

$[n_y]$  – допускаемый коэффициент запаса устойчивости.

Для нормирования устойчивости конструкции принимается наименьший коэффициент запаса устойчивости. Для каждого типа элемента несущей конструкции принимается своя методика определения критических напряжений сжатия. Для сжатых стержневых элементов (обвязки, стрингеры, стойки, дуги) конструкции применяется метод Эйлера. Критические напряжения плоских пластин обшивки рассчитываются с учетом их подкрепления стержневыми элементами или гофрами. Расчет производится по критериям общей и местной потери устойчивости.

Допускаемые значения коэффициента запаса устойчивости назначаются в рамках поставленной задачи в зависимости от конструкции, точности расчета и ответственности рассчитываемых узлов.

Для исключения резонанса конструкции в процессе эксплуатации под воздействием вибрационных нагрузок важно определение нижней частоты собственных изгибных колебаний (и соответствующей ей формы колебаний), которая не должна лежать в диапазоне частот внешних сил. Допускаемая амплитуда динамических напряжений конструкции определяется характером эксплуатации конструкции и усталостной долговечностью.

Усталостная долговечность оценивается по коэффициенту запаса сопротивления усталости:

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,\varepsilon}} \geq [n_y] , \quad (2.5)$$

где  $\sigma_{a,N}$  – предел выносливости (по амплитуде) исследуемой области конструкции при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов  $N_o = 10^7$ ;

$\sigma_{a,\varepsilon}$  – расчетная величина эквивалентной амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенная к базовому числу циклов  $N_0$ ;  
[ $n_y$ ] – допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости исследуемой области конструкции.

Расчет на усталостную долговечность конструкции осуществляется с условием вероятностного характера динамического нагружения и рассеивания характеристик сопротивления усталости конструкции [123]. Допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости назначается в соответствии с рекомендациями ГОСТ 34093.

## **2.3 Исследование особенностей применения методов компьютерного моделирования для оценки параметров несущей конструкции кузова вагона**

### **2.3.1 Оценка массы несущей конструкции**

Традиционно масса несущей конструкции кузова вагона определяется путем взвешивания.

Для оценки массы металлоконструкции вновь проектируемых вагонов рационально использовать системы автоматизированного проектирования, позволяющие сформировать детализированную твердотельную модель несущей конструкции кузова вагона. В инженерных программных комплексах трехмерного проектирования, реализующих метод конечных элементов (например, Siemens PLM Software NX), расчет массы осуществляется автоматически внутренними алгоритмами графического ядра Parasolid.

Поскольку в вагоне не меняется внутреннее и навесное тяжеловесное оборудование, а планируемые изменения вносятся только в металлоконструкцию кузова, оценка массы кузова вагона выполняется на основе детализированной твердотельной пространственной модели металлоконструкции.

### 2.3.2 Применение МКЭ для оценки прочности, устойчивости и частоты собственных изгибных колебаний конструкции

Анализ отечественного и зарубежного опыта исследований в области прочности несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов, проведенный в первом разделе работы, показал, что в настоящее время широкое распространение для исследования напряженно-деформированного состояния сложных несущих конструкций получил МКЭ.

Реализация МКЭ возможна на большом количестве программных комплексов, позволяющих создавать детализированные конечноэлементные модели и выполнять их расчет.

В основании МКЭ заложено разбиение геометрии твердого деформируемого тела на линейные, плоские или объемные простейшие элементы. В качестве элементов, наиболее часто используемых на практике, выступают линейные стержневые элементы (работающие на растяжение (сжатие), кручение и изгиб), плоские пластинчатые элементы (учитывают мембранные, сдвиговые, поперечные и изгибные силовые факторы) и объемные трехмерные элементы. Каждая сторона элемента содержит два и более узлов. Для каждого узла элемента задаются координаты, описывающие его смещение. Формула совокупности узловых смещений одного конечного элемента в матричной форме записывается следующим образом [124]:

$$\{\lambda\} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}^T, \quad (2.6)$$

где  $N$  – количество узловых смещений элемента;

$T$  – транспонирование матрицы.

Задание узловых смещений может также выражаться через компоненты вектора перемещения узлов и углов поворота элемента.

Аппроксимирование компонент вектора перемещения  $\vec{u}$  той или иной точки  $B$  каждого элемента через узловые смещения:

$$u_i(B) = \Phi_{ik}(B)\lambda_k, \quad (2.7)$$

где  $\Phi_{ik}(B)$  – функция формы элемента, отражающая связь узловых смещений и перемещений точек тела;

$$i = 1, 2, 3, k = 1, 2, \dots, N.$$

В матричной форме данное выражение примет вид:  $\{u\} = \{\Phi\}\{\lambda\}$ .

В векторной форме:  $\vec{u} = \Phi_{ik}\vec{e}_i\lambda_k$ , где  $\vec{e}_i$  – единичные орты.

Выражения (2.7) для каждого конечного элемента подставляются в уравнения равновесия тела, из которых находятся узловые смещения  $\{\lambda\}$ .

Уравнения равновесия деформируемого тела составляются исходя из принципа возможных перемещений его точек, ограниченных наложенными на тело связями. В соответствии с принципом возможных перемещений приращение работы внутренних сил  $\delta U$  равно работе внешних сил  $\delta W$ :

$$\delta U = \delta W. \quad (2.8)$$

Работа внешних и внутренних сил соответственно описывается выражениями [125]:

$$\delta W = \int_V \vec{q} \cdot \delta \vec{u} dV + \int_S \vec{p} \cdot \delta \vec{u} dS, \quad (2.9)$$

$$\delta U = \int_V \sigma \cdot \delta \varepsilon dV, \quad (2.10)$$

где  $\vec{q}$  – внешняя нагрузка, рассредоточенная по объему тела  $V$ ;

$\delta \vec{u} = \Phi_i \delta \lambda_i$  – возможное малое перемещение;

$\vec{p}$  – нагрузка, рассредоточенная по поверхности тела  $S$ ;

$\sigma = \sigma_{ij}\vec{e}_i\vec{e}_j$  – тензор напряжений,  $\vec{e}_i$  – единичные орты,  $i, j = 1, 2, 3$ ;

$\varepsilon = \varepsilon_{ij}\vec{e}_i\vec{e}_j$  – тензор деформаций.

Следовательно, уравнение равновесия (2.8) примет вид:

$$\int_V \sigma \cdot \delta \varepsilon dV = \int_V \vec{q} \cdot \delta \vec{u} dV + \int_S \vec{p} \cdot \delta \vec{u} dS. \quad (2.11)$$

В случае малых деформаций тела тензор деформаций равен тензорному оператору:

$$\varepsilon = \nabla \vec{u}, \quad (2.12)$$

$$\nabla \vec{u} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \vec{e}_i \vec{e}_j, \quad (2.13)$$

где  $x_i, x_j$  – оси координат, направленные в соответствии с единичными векторами  $\vec{e}_i, \vec{e}_j$ .

Подставив выражение компонент перемещения (2.7) в выражение тензора деформаций (2.12), получим уравнение:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \Phi_{ik}}{\partial x_j} + \frac{\partial \Phi_{jk}}{\partial x_i} \right) \lambda_k. \quad (2.14)$$

Матричная запись определения компонент тензора деформаций через смещения узлов имеет вид:  $\{\varepsilon\} = \{\Delta\Phi\}\{\lambda\}$ , где  $\{\Delta\Phi\}$  – матрица взаимосвязи узловых смещений и деформаций.

Посредством закона Гука в области упругих деформаций тела описывается связь между компонентами тензора напряжений и деформаций [126]:

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (2.15)$$

где  $D_{ijkl}$  – упругие константы тела,  $ijkl = 1, 2, 3 \dots$

Уравнение (2.6) в матричной форме выражения примет вид:

$$\{\sigma\} = \{D\}\{\varepsilon\}. \quad (2.16)$$

Зависимость тензора деформаций от узловых смещений с учетом выражения (2.14) будет иметь вид:

$$\{\sigma\} = \{D\}\{\Delta\Phi\}\{\lambda\}. \quad (2.17)$$

Подставив выражения (2.12, 2.15) в уравнение равновесия тела (2.11) получим:

$$\int_V D \nabla \vec{u} \cdot \delta(\nabla \vec{u}) dV = \int_V \vec{q} \cdot \delta \vec{u} dV + \int_S \vec{p} \cdot \delta \vec{u} dS. \quad (2.18)$$

Узловые смещения конечного элемента с объемом  $V_e$  и поверхностью  $S_e$  находятся путем подставки выражения (2.7) в уравнение равновесия тела (2.18):

$$\delta \lambda_i \cdot \left\{ \int_{V_e} \nabla \Phi_i \cdot D \nabla \Phi_j \cdot \lambda_j dV - \int_{V_e} \vec{q} \cdot \Phi_i dV - \int_{S_e} \vec{p} \cdot \Phi_i dS \right\} = 0, \quad (2.19)$$

где  $i, j = 1, 2, \dots, N$ .

С учетом того, что узловые смещения являются произвольными, не равными нулю величинами, то для выполнения условия равенства нулю должны быть равны все компоненты, находящиеся в фигурных скобках. В связи с этим, условия

равновесия конечного элемента описываются системой линейных алгебраических выражений:

$$\{K\}\{\lambda\} = \{f\}, \quad (2.20)$$

где  $\{K\}$  – матрица жесткости элемента;

$\{f\}$  – вектор узловых сил элемента.

$$K_{ij} = \int_{V_e} \nabla \Phi_i \cdot D \Delta \Phi_j dV, \quad (2.21)$$

$$f_i = \int_{V_e} \bar{q} \cdot \Phi_i dV + \int_{S_e} \vec{p} \cdot \Phi_i dS, \quad (2.22)$$

где  $i, j = 1, 2, \dots, N$ .

В конечном итоге, система уравнений равновесия тела представляет собой совокупность уравнений (2.20) всей совокупности конечных элементов тела с добавлением уравнений, описывающих граничные условия:

$$\{\vec{K}\}\{\vec{\lambda}\} = \{\vec{f}\}, \quad (2.23)$$

где  $\{\vec{K}\}$  – глобальная матрица жесткости тела;

$\{\vec{\lambda}\}$  и  $\{\vec{f}\}$  – векторы узловых перемещений и сил тела.

Выражения типа (2.23) применяются для расчета конструкций в статической постановке. Применяв принцип д'Аламбера к выражению (2.23) путем включения объемных сил инерции в интеграл для узловых сил

$$\vec{q}^{in} = -\rho \Phi_j \cdot \ddot{\lambda}_j, \quad (2.24)$$

получим систему уравнений движения элемента:

$$\{M\}\{\ddot{\lambda}_j\} + \{K\}\{\lambda\} = \{f\}, \quad (2.25)$$

где  $M_{ij} = \int_{V_e} \rho \Phi_i \cdot \Phi_j dV$  – матрица масс элемента,  $\rho$  – плотность;

$\{\ddot{\lambda}_j\}$  – вторая производная по времени вектора узловых смещений.

Вводя матрицу коэффициентов демпфирования  $\{B\}$  с учетом сил вязкого сопротивления уравнение движения примет вид:

$$\{M\}\{\ddot{\lambda}_j\} + \{B\}\{\dot{\lambda}\} + \{K\}\{\lambda\} = \{f\}. \quad (2.26)$$

Собственные колебания тела, при отсутствии внешних сил, описываются системой уравнений:

$$[-\omega^2\{\overline{M}\} + \{\overline{K}\}]\{\overline{\lambda}\} = 0, \quad (2.27)$$

где узловые смещения определяются как  $\{\lambda\}e^{i\omega t}$ , где  $\omega$  – частота,  $t$  – время.

Исходя из того, что определитель системы уравнений равен нулю, определяются собственные частоты  $\omega_1, \omega_2, \dots$  колебаний, а затем – соответствующие им собственные векторы узловых смещений  $\{\vec{\lambda}\}_i$ , где  $i = 1, 2, \dots$ , именуемые как собственные формы колебаний конструкции.

В случае решения задач упругой устойчивости элементов конструкции уравнения равновесия следует составлять, учитывая измененную геометрию тела вследствие деформации:

$$[\{\overline{K}\} - \beta\{\overline{K}_d\}]\{\overline{\lambda}\} = 0, \quad (2.28)$$

где  $\{\overline{K}_d\}$  – матрица геометрической жесткости;

$\beta$  – параметр нагрузки.

Значения параметров нагрузки  $\beta_1, \beta_2, \dots$ , определяющие решения узловых смещений, находятся путем приравнивания определителя системы к нулю. В результате чего образуются новые формы равновесия тела. Критическая нагрузка  $F^{кр}$  приводит к потере устойчивости первой формы равновесия конструкции. Значения параметров нагрузки являются критическими, то есть они показывают значение отношения критической нагрузки к действующей нагрузке  $F$ :

$$F_i^{кр} = \beta_i F, \quad (2.29)$$

где  $i = 1, 2, \dots, N$ .

Значение для исследователя имеет первая наименьшая критическая нагрузка  $F_1^{кр}$ .

Расчет конструкции МКЭ является трудоемким вследствие высокого порядка систем уравнений, и его применение целесообразно осуществлять исключительно на электронно-вычислительной машине. Точность результата расчета конструкции во многом зависит от параметров сетки конечноэлементной модели, контролируемых пользователем. К таким параметрам относятся размер и регулярность сетки. Разбиение сетки может осуществляться автоматически или вручную. Основным способом разбиения сетки является автоматический метод. Изначально определив тип элемента, на первом этапе разбиения сетки, задаются

размеры конечных элементов, которые зависят от особенностей геометрии исследуемой конструкции. Оптимальный размер конечного элемента позволяет получить результаты расчета с допустимым уровнем ошибок за удовлетворительное время расчета.

Мелкая сетка целесообразна там, где возможны значительные относительные деформации или напряжения, в местах концентраторов напряжений, а также в областях, представляющих особый интерес для исследователя [127].

Практика расчета конструкций МКЭ позволяет сделать следующие выводы по организации конечноэлементной сетки: сетка рекомендуется упорядоченная, преимущественно прямоугольная с четырехузловыми элементами (возможно применение других простейших, желательно равносторонних элементов, таких как треугольник), следует избегать слишком вытянутых и узких элементов, четырехузловые элементы должны иметь углы менее  $180^\circ$ , в местах концентраторов напряжений не рекомендуется использовать элементы, граничащие между собой с существенной разницей геометрических размеров, целесообразно увеличивать размер конечных элементов в направлении от градиента напряжений [128,129].

Оценку качества полученной конечноэлементной сетки конструкции можно произвести по показателям, представленным в таблице 2.1 [130,131].

**Таблица 2.1 – Показатели качества конечного элемента**

Параметр	Треугольники		Четырехугольники	
	Оптимальное значение	Рекомендованное значение	Оптимальное значение	Рекомендованное значение
Коэффициент формы		1...1,3		1...4
Минимальный угол	$60^\circ$	$30^\circ \dots 60^\circ$	$90^\circ$	$45^\circ \dots 90^\circ$
Максимальный угол	$60^\circ$	$60^\circ \dots 90^\circ$	$90^\circ$	$90^\circ \dots 135^\circ$
Отношение максимального угла к минимальному	1	-	1	-
Отношение максимальной стороны к минимальной	1	1...4	1	1...4
Отношение площади к квадрату периметра	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	0,5...2	0,00625	0,04...0,1
Вытянутость	-	-	1	0,25...1

Среди них такой показатель как коэффициент формы. Для того, чтобы найти коэффициент формы неравностороннего элемента, необходимо для каждой из его сторон найти площадь идеального элемента. Отношение среднего значения идеальной площади к реальной площади неравностороннего элемента даст величину коэффициента формы.

Ориентиром в назначении шага сетки выступает оценка сходимости конечноэлементного решения к точному. Погрешность в определении напряжений и деформаций при этом имеет порядок  $Ch/L$ , где  $C$  – константа, зависящая от формы области;  $h$  – шаг сетки;  $L$  – характерный размер области [127].

Данная оценка носит прикидочный характер, поэтому шаг сетки выбирается на основе опыта решения конечноэлементных задач в вагоностроении [4, 12, 13, 17, 132-134].

### **2.3.3 Оценка усталостной долговечности несущей конструкции**

Проведённый анализ работ, посвященных оценке усталостной долговечности сварных несущих конструкций кузовов вагонов, показал, что ее целесообразно проводить в рамках двух подходов: в квазистатической постановке с использованием в расчете коэффициента динамики в соответствии с ГОСТ 34093 и в динамической постановке на основе методов компьютерного моделирования [20, 101, 134]. При этом первый подход обеспечивает весьма приближенные результаты и не учитывает в полной мере характер динамических нагрузок, в связи с чем целесообразно использовать второй подход исследования долговечности несущих конструкций кузовов вагонов в динамической постановке в среде программного комплекса «Универсальный механизм», позволяющего смоделировать динамику пространственной механической системы [96,135].

При движении вагона по неровностям железнодорожного пути возникают циклические нагрузки, которые оказывают наибольшее влияние на возникновение усталостных повреждений конструкции и носят случайный характер. Вследствие чего режим нагружения несущей конструкции вагона при движении является

неустановившимся, а процесс изменения динамических напряжений – нестационарным. Целесообразно для несущих конструкций, работающих в неустановившемся режиме нагружения, оценку усталостной долговечности производить в рамках модели многоциклового усталости [136, 137] на основе линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений.

Оценку усталостной долговечности несущей конструкции кузова пассажирского вагона целесообразно проводить в два этапа.

На первом этапе в результате моделирования на основании гибридной динамической модели пассажирского вагона рассчитываются динамические силы, действующие на несущую конструкцию при движении вагона по реальным неровностям пути.

На втором этапе динамические силы, возникающие в шкворневом узле и в зонах скользунов конструкции в виде осциллограмм изменения усилий во времени прикладываются к детализированной конечноэлементной модели. Расчет конструкции выполняется в динамической постановке, в результате чего формируются графики изменения напряжений в наиболее нагруженных зонах конструкции, которые приняты в качестве источников повреждающего воздействия.

Анализ усталостной долговечности в работе выполняется в соответствии с двумя методиками: С.В. Серенсена – В.П. Когаева [136,138] и В.В. Болотина [139].

В соответствии с методикой В.В. Болотина распределение динамических напряжений, действующих на конструкции, реализуется посредством использования теории вероятностей, а методика С.В. Серенсена – В.П. Когаева основывается на истории нагружения в виде степенной функции.

В соответствии с методикой С.В. Серенсена – В.П. Когаева срок службы конструкции в годах до наступления предельного состояния с учетом требований ГОСТ 34093 рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{\left( \frac{\sigma_{a,N}}{n_y} \right)^m \cdot N_0}{\left( \sum_{i=1}^k \sigma_{ai}^m \cdot P_i \right) \cdot B \cdot f_s}, \quad (2.30)$$

где  $m$  – показатель степени в уравнении кривой усталости в амплитудах;

$\sigma_{ai}^m$  – уровень амплитуды напряжений;

$P_i$  – вероятность появления амплитуд с уровнем  $\sigma_{ai}^m$ ;

$B$  – коэффициент перевода срока службы в годах во время непрерывного движения в секундах;

$f_3$  – центральная (эффективная) частота процесса изменения динамических напряжений.

В соответствии с методикой В.В. Болотина срок службы конструкции определяется соотношением

$$T = \frac{a \cdot N_0 \cdot \varphi_\sigma^m \cdot \sigma_{a,N}^m \cdot v}{1,314 \cdot 10^6 \cdot f_3 \cdot S_\sigma^m \cdot [n_y] \cdot J \cdot L_c}, \quad (2.31)$$

где  $a$  – сумма относительных усталостных повреждений;

$\varphi_\sigma$  – коэффициент учета асимметрии циклов нагружения;

$v$  – средняя маршрутная скорость движения вагона;

$S_\sigma$  – среднее квадратичное отклонение процесса  $\sigma(t)$ ;

$J$  – интеграл, зависящий от коэффициента широкополосности процесса  $\sigma(t)$  и определяемый в соответствии с [139];

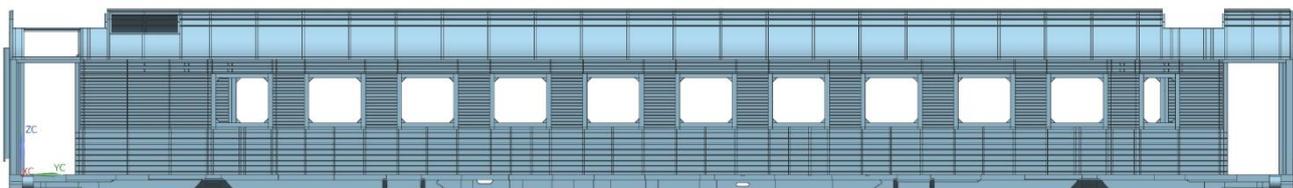
$L_c$  – проектный среднесуточный пробег вагона.

Расчет эквивалентной амплитуды динамических напряжений проводится путем обработки осциллограмм изменения напряжений во времени, полученных при анализе прочности, методом полных циклов.

## 2.4 Разработка твердотельной модели кузова пассажирского вагона

Разработка детализированной твердотельной геометрической модели кузова пассажирского вагона модели 61-4447 выполнялась в среде промышленного программного комплекса Siemens PLM Software NX (рисунок 2.2) [140].

Твердотельная геометрическая модель кузова позволила оценить массу металлоконструкции с достаточной точностью, которая составила 12,9 т.

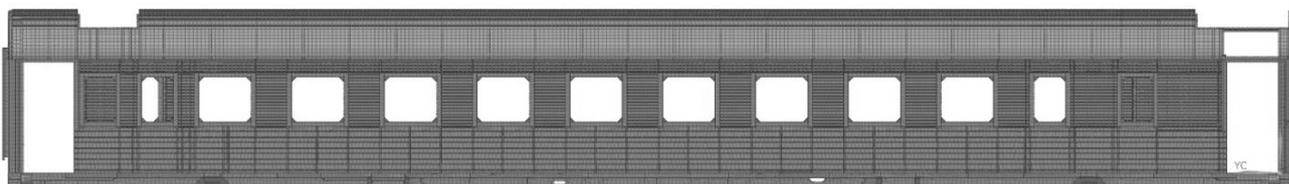


**Рисунок 2.2 – Детализированная твердотельная модель несущей конструкции кузова пассажирского вагона модели 61-4447**

Разница масс металлоконструкции вагона-аналога, полученной с использованием созданной трехмерной модели с массой реальной конструкции не превысила 1,3%.

### **2.5 Разработка и верификация пластинчатой конечноэлементной модели кузова пассажирского вагона**

Оценка напряженно-деформированного состояния несущей конструкции кузова пассажирского вагона модели 61-4447 осуществлялась на основе детализированной пластинчатой конечноэлементной модели (рисунок 2.3) [141-143].



**Рисунок 2.3 – Пластинчатая конечноэлементная модель несущей конструкции кузова пассажирского вагона модели 61-4447**

Разработка конечноэлементной модели осуществлялась на основе твердотельной пространственной модели в среде программного комплекса Siemens PLM Software NX посредством встроенных программных алгоритмов. Сформированная пластинчатая конечноэлементная модель представляет собой подкрепленную оболочечную структуру, выстроенную по срединной поверхности элементов конструкции. Моделирование круглых гофров настила пола и обшивки крыши выполнено трапециевидными гофрами с инерциальными характеристиками, соответствующими круглым гофрам рассматриваемых элементов.

Пластинчатая конечноэлементная модель вагона-аналога состоит из 149 тыс. трех- и четырехузловых конечных элементов, обладающих изотропными свойствами, объединенными в 139 тыс. узлах. Средний размер четырехузловых элементов – 80×80 мм. Число степеней свободы пластинчатой конечноэлементной модели составило 832 тыс.

Масса металлоконструкции кузова составила 12,9 т. Масса брутто кузова вагона составила 48,7 т.

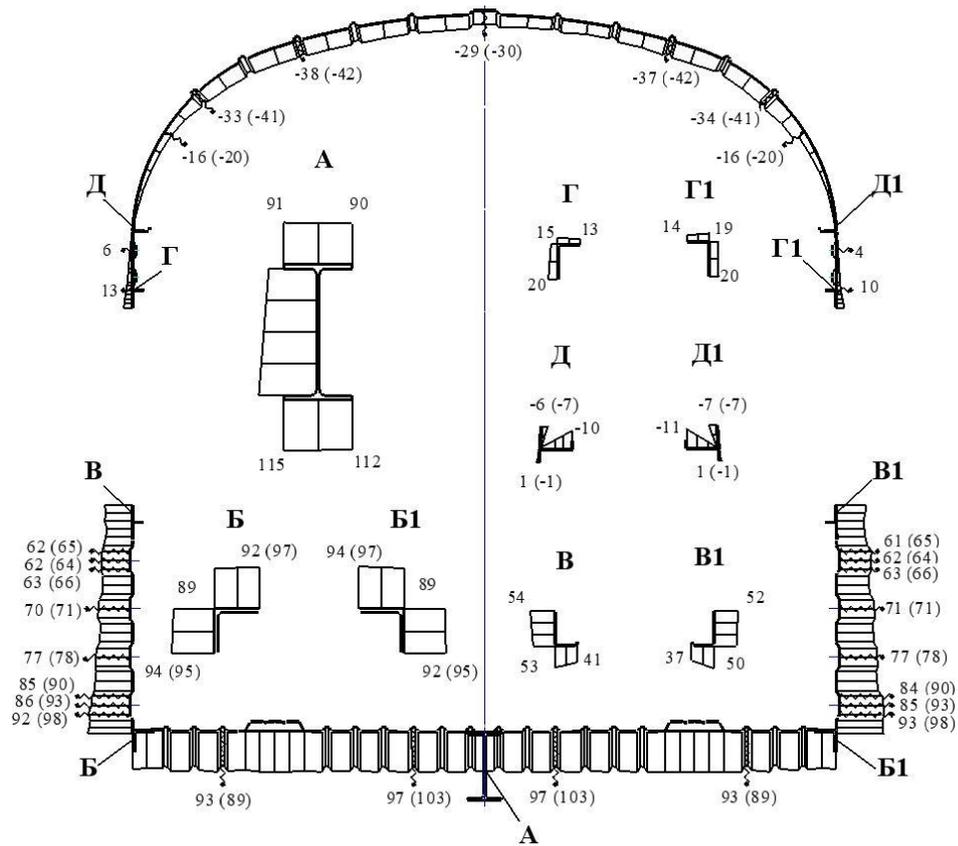
На расчетную модель кузова наложено пять ограничений: перемещение в вертикальном направлении в местах установки скользунов; перемещение в продольном направлении в одном из пятников, перемещение в поперечном направлении, а также поворот относительно вертикальной и продольной осей вагона в обоих пятниках.

Проверка адекватности разработанной конечноэлементной модели несущей конструкции кузова пассажирского вагона реализована путем сравнения результатов компьютерного расчета с результатами натурных статических стендовых испытаний, проведенных ЗАО НО «ТИВ» [7]. Для сравнения использованы значения нормальных напряжений в поперечном сечении кузова по оконному проему, ближайшем к срединному сечению.

Нагружение расчетной модели осуществлялось в соответствии с испытаниями и рекомендациями нормативной документации [7]. Для расчета использованы три варианта нагружения: продольная сжимающая (2,5 МН) и растягивающая нагрузка (1,5 МН), а также вертикальная нагрузка от веса брутто кузова. Приложение продольных нагрузок осуществлялось в хребтовой балке, в местах расположения задних и передних упоров автосцепки. Вертикальная нагрузка от веса брутто вагона перераспределялась по полу кузова путем задания измененной плотности материала.

В результате математических расчетов получены распределения нормальных напряжений в поперечном сечении кузова по оконному проему для каждого вида нагружения, представленные в виде эпюр (рисунки 2.4-2.6). В скобках указаны значения напряжений, полученные при натурных испытаниях.

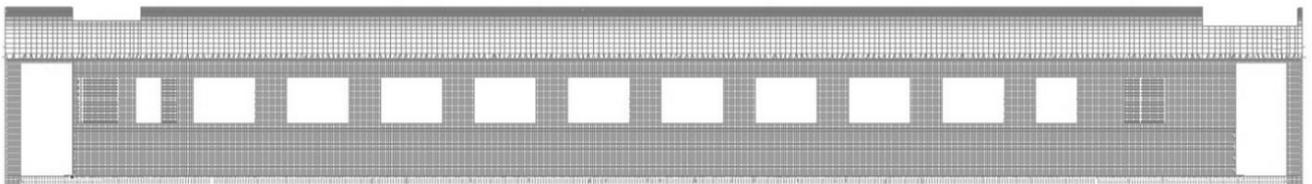




**Рисунок 2.6 – Эпюры нормальных напряжений пластинчатой модели кузова вагона от действия растягивающей нагрузки 1,5 МН, МПа**

Следует отметить, что разница расчетных значений нормальных напряжений, полученных на основе пластинчатой модели с опытными значениями нормальных напряжений, не превысила 17%.

Для проведения дополнительной верификации пластинчатой модели кузова пассажирского вагона была также разработана детализированная пластинчато-стержневая конечноэлементная модель кузова вагона-аналога (рисунок 2.7).



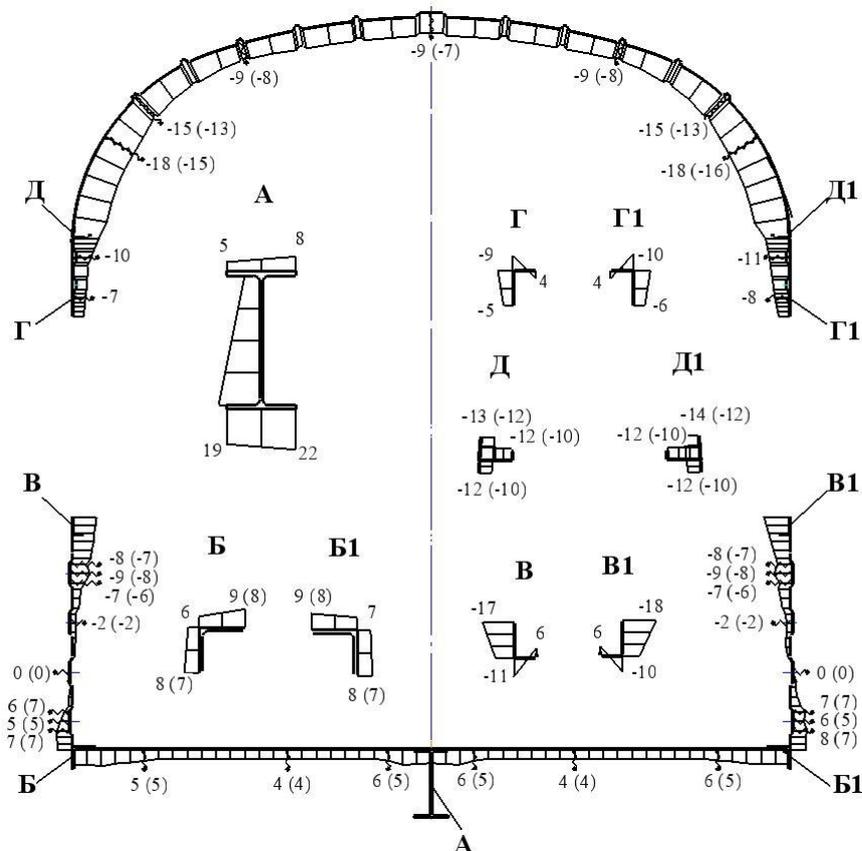
**Рисунок 2.7 – Пластинчато-стержневая конечноэлементная модель несущей конструкции кузова пассажирского вагона модели 61-4447**

Формирование конечноэлементной модели осуществлялась в среде программного комплекса, реализующего метод конечных элементов, Siemens PLM

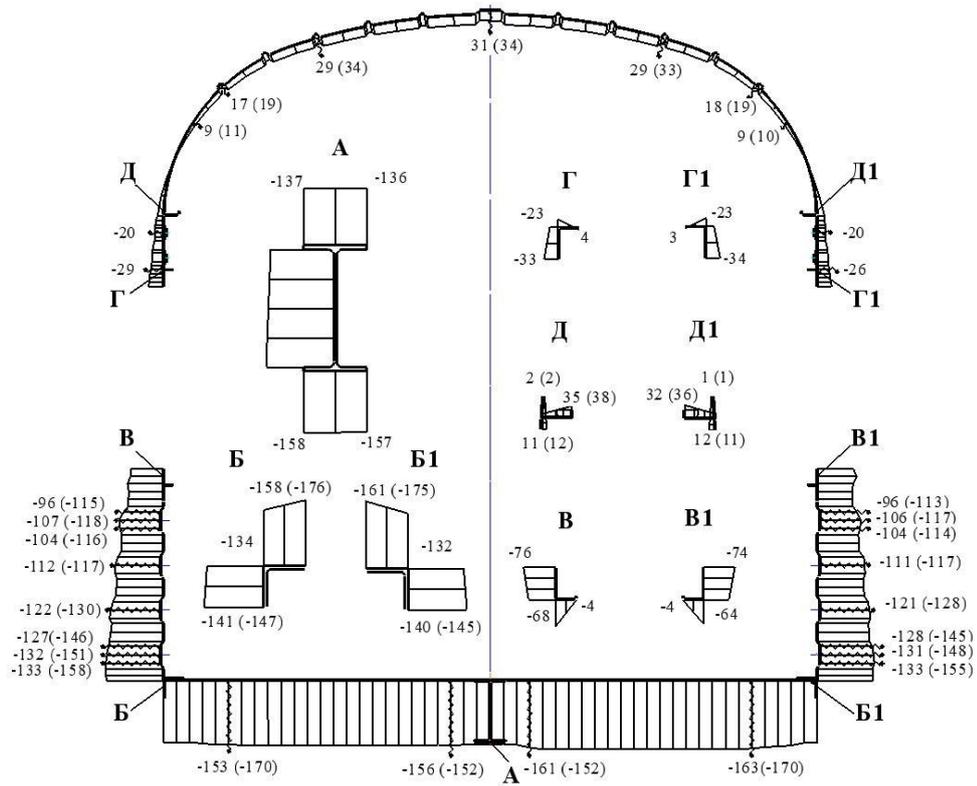
Software Femap [144]. На начальном этапе была разработана идеализированная геометрическая пространственная модель, на основе которой посредством встроенных программных алгоритмов была сформирована дискретная модель.

Обшивка кузова в сформированной конечноэлементной модели реализована трех- и четырехузловыми пластинчатыми элементами, а каркас кузова выполнен двухузловыми стержневыми элементами. Пластинчато-стержневая расчетная модель состоит из 12,7 тыс. стержневых конечных элементов и 87 тыс. пластинчатых элементов, объединенных в 132 тыс. узлах. Число степеней свободы модели составило 795 тыс. Задание граничных условий и нагрузок в пластинчато-стержневой модели выполнено аналогично пластинчатой модели.

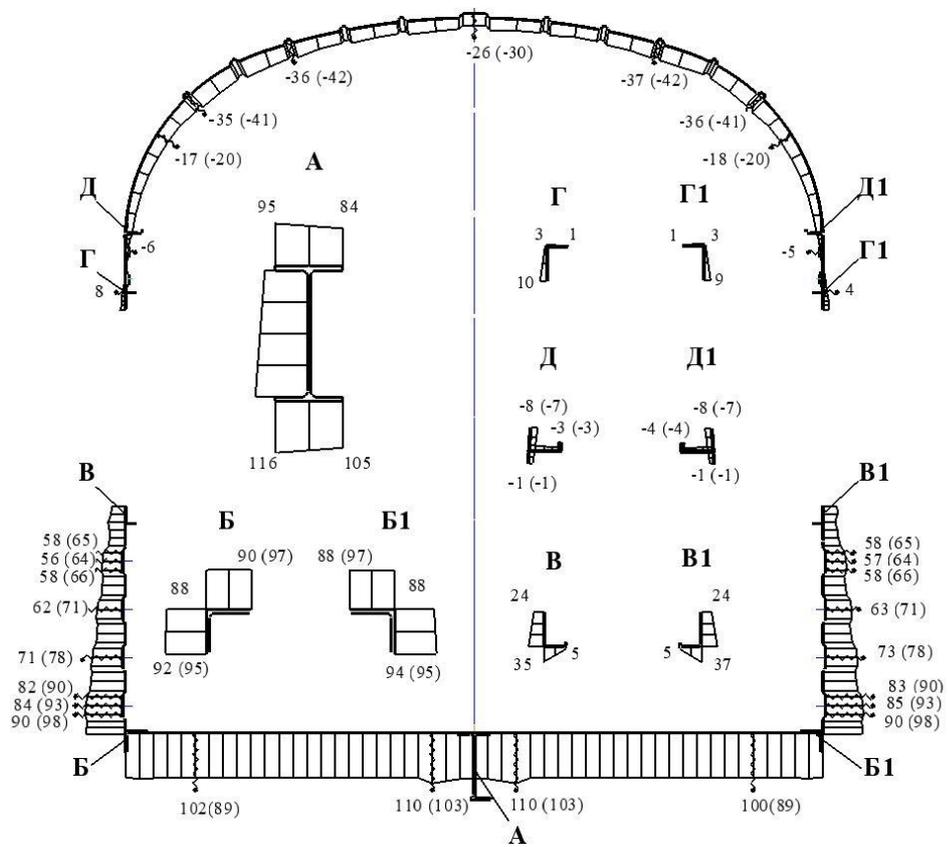
Расчетные значения нормальных напряжений в поперечном сечении кузова пластинчато-стержневой конечноэлементной модели для каждого вида нагружения также сопоставлены с результатами стендовых испытаний и представлены в виде эпюр (рисунки 2.8-2.10).



**Рисунок 2.8 – Эпюры нормальных напряжений пластинчато-стержневой модели кузова вагона от действия вертикальной нагрузки, МПа**



**Рисунок 2.9 – Эпюры нормальных напряжений пластинчато-стержневой модели кузова вагона от действия сжимающей нагрузки 2,5 МН, МПа**



**Рисунок 2.10 – Эпюры нормальных напряжений пластинчато-стержневой модели кузова вагона от действия растягивающей нагрузки 1,5 МН, МПа**

Значения напряжений, полученных при натуральных испытаниях, указаны цифрами в скобках.

На основании приведенных эпюр (рисунок 2.8-2.10) можно сделать вывод, что нормальные напряжения, полученные расчетным и опытным путем по сечению кузова для трех видов нагружения, количественно и качественно близки, их разница не превышает 20%, что на 3% выше, чем у пластинчатой модели. Из чего следует, что разработанная пластинчатая конечноэлементная модель кузова вагона обеспечивает адекватность получаемых на ее основе результатов.

Также выполнена верификация пластинчатой модели металлоконструкции кузова вагона по первой собственной частоте изгибных колебаний кузова в вертикальной плоскости. Расчетное значение частоты собственных изгибных колебаний кузова определено методом Ланцоша, сочетающим в себе преимущества итерационных методов и методов приведения, и реализовано в виде стандартной программной процедуры решателя NX Nastran. Расчетное значение частоты собственных изгибных колебаний составило 10,841 Гц, при этом значение, полученное при натуральных испытаниях, проведенных ЗАО НО «ТИВ», составило 10,8 Гц [145].

Проведенное сопоставление данных полученных с использованием пластинчатой модели, пластинчато-стержневой модели и натуральных экспериментов показало их удовлетворительное соответствие, что подтверждает адекватность результатов, получаемых с использованием пластинчатой модели, которая планируется к использованию для расчетов по выбору рациональной несущей конструкции кузова пассажирского вагона.

## **2.6 Разработка конечноэлементной модели кузова с внутренним и навесным оборудованием**

Традиционным допущением в расчетных конечноэлементных моделях кузовов вагонов является равномерное распределение массы брутто кузова по металлоконструкции путем задания измененной плотности материала. Данный

способ позволяет быстро смоделировать нагружение и получить удовлетворительные результаты напряженно-деформированного состояния конструкции. Но следует отметить, что разница масс полностью оборудованного и экипированного кузова с металлоконструкцией кузова составляет около тридцати тонн, из них более двух тонн приходится на экипировку вагона, а все остальное – на навесное и внутреннее оборудование.

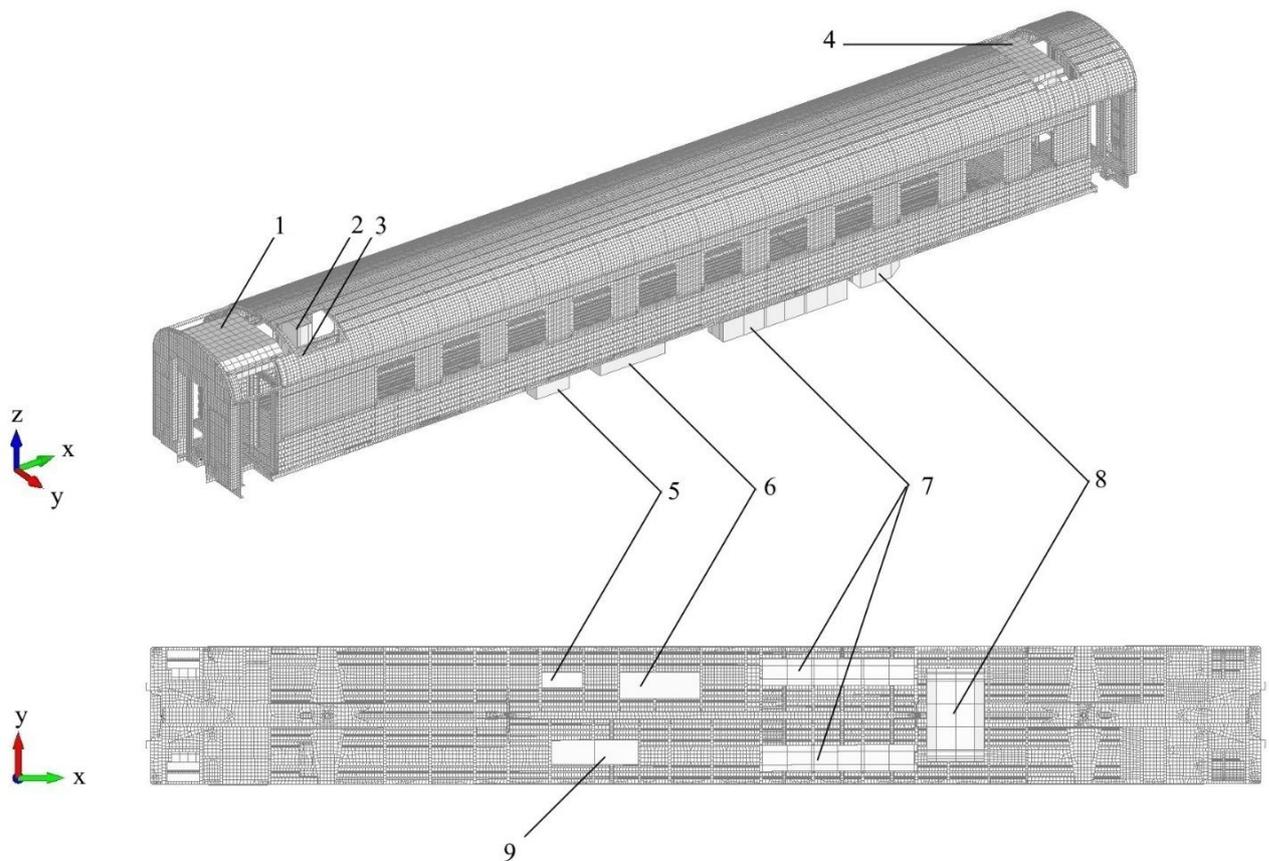
Равномерное распределение массы брутто по металлоконструкции приводит к утяжелению несущих элементов кузова и искажению их напряженно-деформированного состояния. Тяжелое внутреннее и навесное оборудование, обладающее значительными инерциальными характеристиками, приводит к повышению локальных напряжений в зонах его крепления и может привести к перераспределению напряженно-деформированного состояния кузова в целом [146,147]. В связи с чем для дальнейшего уточненного исследования напряженно-деформированного состояния кузова разработанная пластинчатая конечноэлементная модель дополнена элементами, моделирующими влияние внутреннего и навесного оборудования. Объемными элементами моделируется оборудование, обладающее массой 140 кг и более: низковольтные ящики, высоковольтный ящик, преобразователь, аккумуляторный бокс, фекальный бак, отделение котельное, пульт управления, кондиционер, баки для воды.

Распределение массы оборудования по кузову вагона выполнено в соответствии с отчетом по определению массы и координат центра тяжести кузова вагона модели 61-4447 [148]. За начало координат принят левый нижний угол кузова тормозного конца вагона. При этом ось «x» проходит вдоль кузова по наружной стороне обшивки левой боковой стены. Ось «y» проходит поперек кузова и совпадает с плоскостью, проходящей по верху хребтовой балки. Ось «z» направлена вверх. Весовые характеристики моделируемого оборудованием элементами вагонного оборудования и координаты их центров тяжести представлены в таблице 2.2.

**Таблица 2.2 – Весовые и координатные характеристики внутреннего и навесного оборудования**

№ п/п	Наименование	Масса, кг	Координаты центра тяжести, м		
			x	y	z
1	Низковольтный ящик	220	10,604	0,636	-0,495
2	Низковольтный ящик	140	9,257	0,574	-0,495
3	Высоковольтный ящик	140	9,237	2,372	-0,450
4	Преобразователь	260	11,872	2,353	-0,495
5	Аккумуляторный бокс	2400	15,659	1,552	-0,406
6	Фекальный бак	630	18,162	1,552	-0,700
7	Отделение котельное	990	2,690	2,596	1,305
8	Пульт управления	270	3,681	0,529	1,202
9	Кондиционер	1200	1,273	1,662	2,665
10	Бак для воды	650	22,949	1,552	2,764
11	Бак для воды	400	21,989	1,552	2,764
Итого		7300			

Расположение осей и крупноблочного тяжеловесного оборудования на модели кузова вагона показано на рисунке 2.11.



*1 – кондиционер; 2 – пульт управления; 3 – отделение котельное; 4 – баки для воды; 5 – высоковольтный ящик; 6 – преобразователь; 7 – аккумуляторный бокс; 8 – фекальный бак; 9 – низковольтные ящики*

**Рисунок 2.11 – Расположение осей и крупноблочного тяжеловесного оборудования на модели кузова вагона**

Тяжеловесное оборудование моделируется в виде однородных параллелепипедов соответствующих по массе и размерам реальному оборудованию. Моделирование фекальных баков и баков для воды выполнено с учетом их заполнения.

Крепление внутреннего и навесного оборудования на раме и крыше кузова вагона осуществляется на специальных кронштейнах и балках конструкции. Связь оборудования с элементами кузова выполнена путем объединения совмещенных узлов оборудования и узлов конструкции, а также абсолютно жесткими одномерными элементами.

Масса неучтенного оборудования и экипировки кузова равномерно распределена по металлоконструкции путем задания новой плотности материала кузова.

Плотность материала  $i$ -го элемента кузова определялась по формуле:

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i}, \quad (2.32)$$

где  $m_i$  – масса элемента кузова с вычетом учтенной массы, обладающая единой плотностью, кг;

$V_i$  – объем весового элемента кузова, м<sup>3</sup>.

Конечноэлементная модель, дополненная элементами, моделирующими влияние внутреннего и навесного оборудования, состоит из 149 тыс. трех- и четырехузловых пластинчатых конечных элементов и 1 тыс. пяти- и шестигранных объемных элементов, объединенных в 141 тыс. узлах. Число степеней свободы пластинчатой конечноэлементной модели составило 884 тыс.

Адекватность разработанной конечноэлементной модели подтверждается удовлетворительным соответствием значения первой собственной частоты изгибных колебаний кузова в вертикальной плоскости данным натурных испытаний (8,128 Гц – расчет, 8,1 Гц – эксперимент) и требованиям ГОСТ 34093.

## **2.7 Разработка и верификация гибридной динамической модели пассажирского вагона**

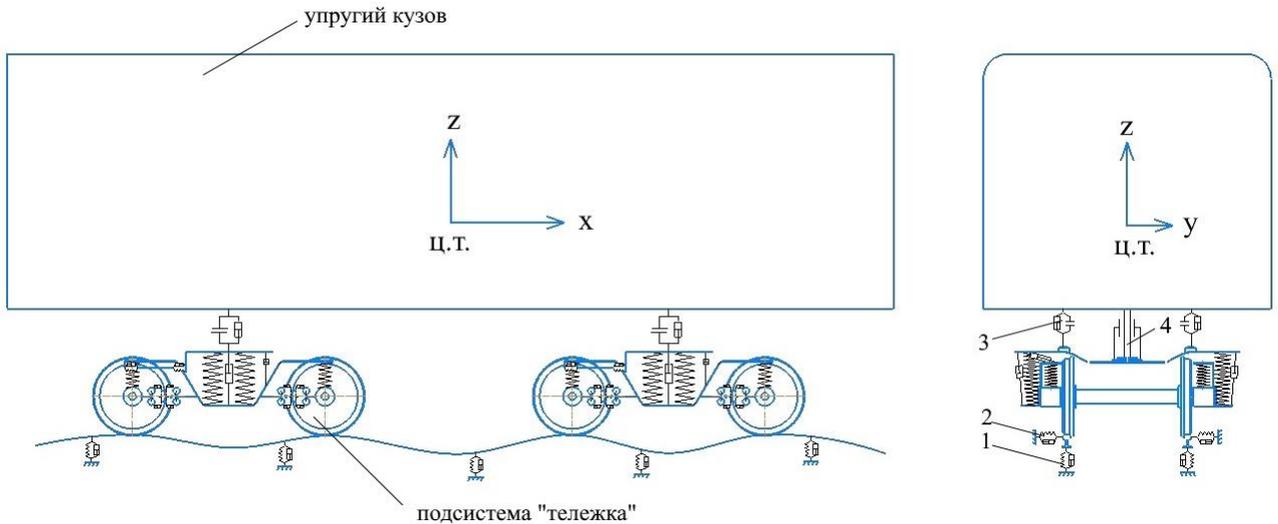
Динамическая нагруженность кузова пассажирского вагона оценивается на основе гибридной динамической модели вагона, разработанной в программном комплексе «Универсальный механизм». Динамическая модель представляет собой систему связанных упругих и абсолютно твердых тел, описывающих колебания вагона в пространстве [146,147].

Упругие свойства тела описываются на основе данных о геометрических и инерционных характеристиках элементов конечноэлементной модели несущей конструкции, разработанной в программном комплексе, реализующем метод конечных элементов. Упругий кузов включен в динамическую модель вагона с помощью модуля моделирования упругих тел UMFEM. Компьютерная модель упругого тела формируется на основе совокупности методов: подсистем, присоединенной системы координат, конечных элементов и связанных подструктур (Крэйга-Бэмптона) [95, 149, 150].

Динамическая модель пассажирского вагона состоит из кузова, смоделированного с учетом внутреннего и навесного оборудования, соединенного силовыми элементами с двумя твердотельными подсистемами – тележками. Структурная схема динамической модели вагона представлена на рисунке 2.12.

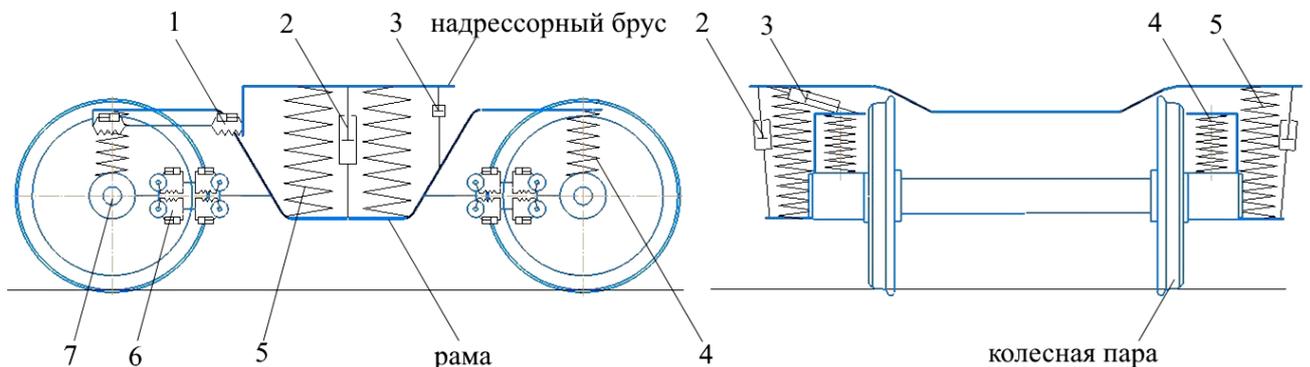
Динамическая модель вагона сформирована посредством упруго-диссипативных элементов, силовых контактных элементов и линейных силовых элементов, являющихся стандартными элементами набора программного комплекса [151].

Динамическая модель тележки состоит из системы абсолютно твердых тел, связанных с помощью кинематических и силовых элементов. Моделирование связей узлов тележки также выполнено стандартными элементами набора программного комплекса в соответствии с работой [152]. Структурная схема динамической модели тележки представлена на рисунке 2.13.



1 - упруго-диссипативный элемент, моделирующий вертикальную жесткость пути; 2 - упруго-диссипативный элемент, моделирующий горизонтальную жесткость пути; 3 – силовой контактный элемент, моделирующий опирание кузова вагона на скользуны; 4 – линейный силовой элемент, моделирующий ограничения горизонтальных перемещений кузова относительно наддрессорного бруса в пятниковом узле

**Рисунок 2.12 – Структурная схема динамической модели пассажирского вагона**



1 – упруго-диссипативный линейный биполярный силовой элемент, моделирующий резинометаллические блоки продольного поводка центральной ступени подвешивания; 2 – диссипативный линейный биполярный силовой элемент, моделирующий вертикальный гаситель колебаний центральной ступени подвешивания; 3 – диссипативный линейный биполярный силовой элемент, моделирующий горизонтальный гаситель колебаний центральной ступени подвешивания; 4 – линейный силовой элемент, моделирующий пружины буксовой ступени подвешивания; 5 – диссипативный линейный биполярный силовой элемент, моделирующий вертикальный гаситель колебаний буксового подвешивания; 6 – упруго-диссипативный нелинейный биполярный силовой элемент, моделирующий резинометаллические блоки буксовых поводков; 7 – вращательный шарнир, моделирующий буксу

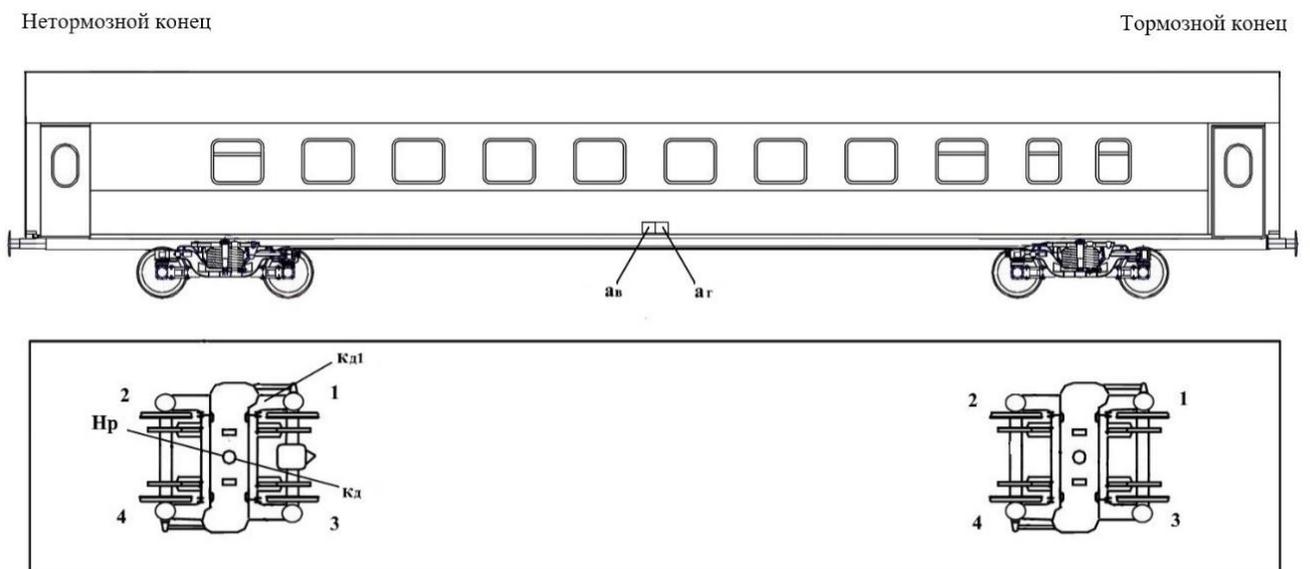
**Рисунок 2.13 – Структурная схема подсистемы «тележка»**

Реализация контактного взаимодействия колеса с рельсом в программном комплексе «Универсальный механизм» выполнена в рамках модели двухточечного контакта, предложенной в работе [153], и аппроксимирующей силы крива аналитическими выражениями.

Коэффициент крива рассчитывается по формуле Мюллера. Расчет сил крива выполняется с помощью алгоритма FASTSIM, основанного на линейной теории Калкера. Профиль колеса при моделировании принимается стандартным неизношенным по ГОСТ 10791. Профиль рельса типа Р65/Р65К принимается неизношенным по ГОСТ Р 51685.

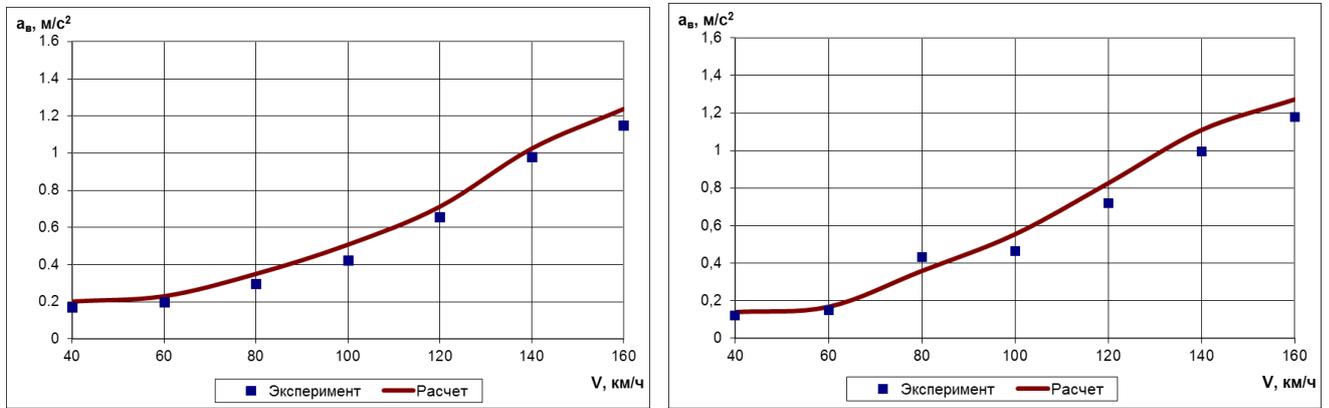
Верификация разработанной гибридной модели пассажирского вагона выполнена на основании данных ходовых динамических испытаний, проводимых для исследуемого вагона. Ходовые динамические испытания выполнялись для опытного поезда при движении в диапазоне скоростей от 40 до 160 км/ч с интервалом 20 км/ч по магистральным участкам пути Санкт-Петербург – Малая Вишера – Санкт-Петербург, по прямым и кривым участкам пути, а также стрелочным переводам.

Схема расположения зон контролируемых динамических показателей на вагоне представлена на рисунке 2.14.



**Рисунок 2.14 – Схема расположения зон контролируемых динамических показателей на вагоне**

Верификация проводилась путем сопоставления результатов испытаний и компьютерного моделирования. Сопоставление результатов представлено в виде графиков зависимостей показателей динамики от скорости движения: вертикальные и горизонтальные ускорения в середине кузова  $a_v$ ,  $a_g$  (рисунки 2.15, 2.16); коэффициент вертикальной динамики буксы тележки нетормозного конца вагона в зоне буксы 1  $K_{дв1}$  (рисунок 2.17); коэффициент вертикальной динамики  $K_{дв}$  в подпятниковой зоне тележки нетормозного конца вагона (рисунок 2.18); рамная сила  $H_p$  в подпятниковой зоне тележки нетормозного конца вагона (рисунок 2.19); показатель плавности хода в вертикальном и горизонтальном направлениях  $W_v$ ,  $W_g$  в середине кузова вагона (рисунок 2.20).

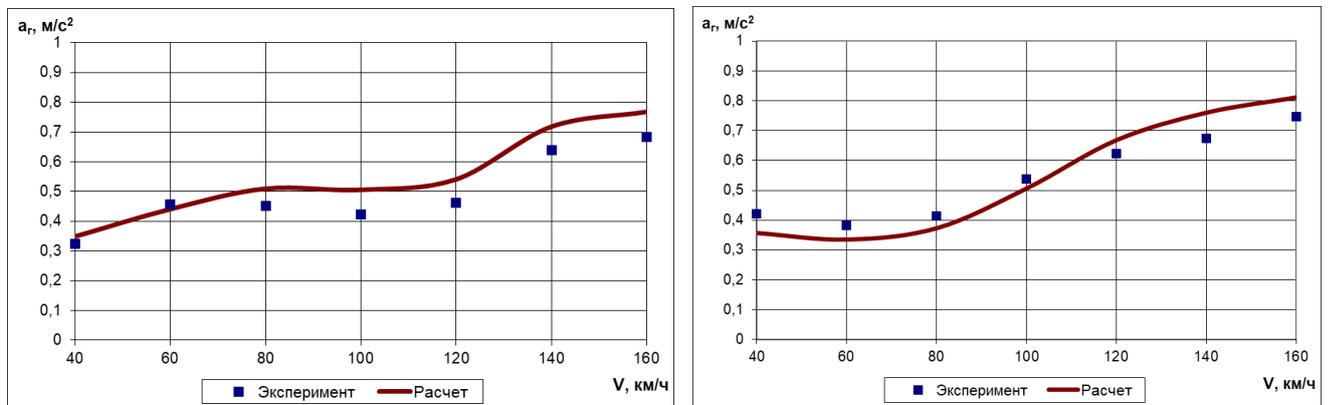


а

б

а) на прямом участке; б) на криволинейных участках

**Рисунок 2.15 – Зависимость вертикальных ускорений кузова от скорости движения вагона**

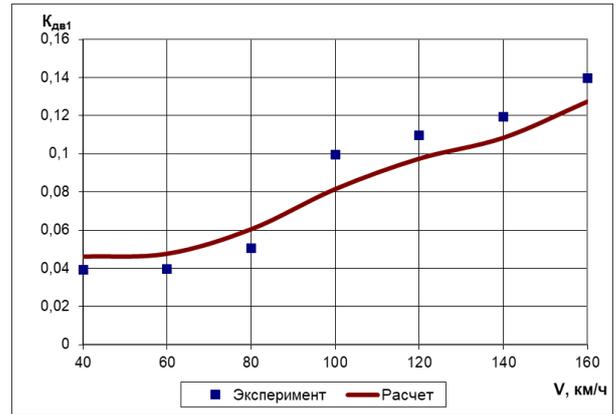
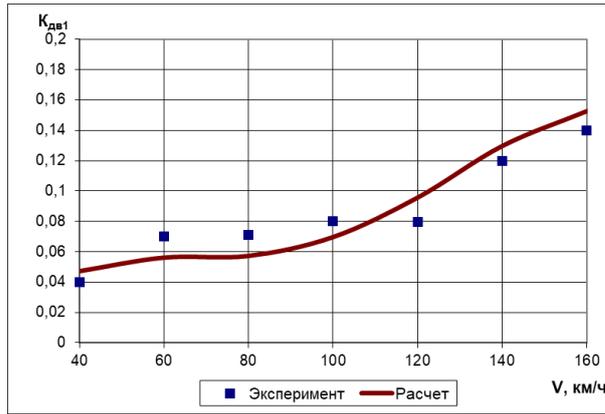


а

б

а) ускорения на прямом участке; б) ускорения на криволинейных участках

**Рисунок 2.16 – Зависимость горизонтальных ускорений кузова от скорости движения вагона**

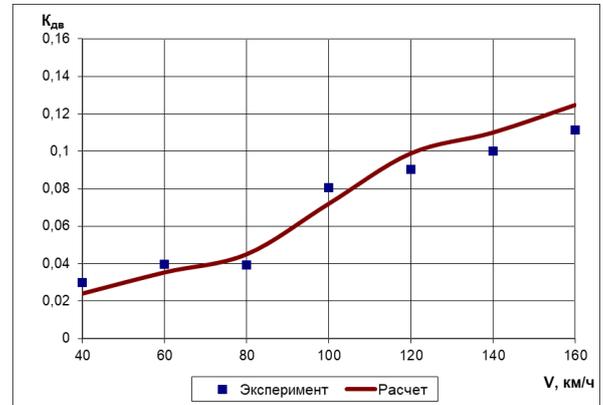
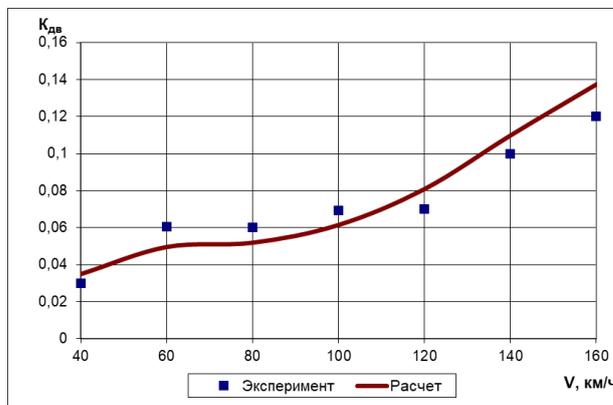


а

б

а) на прямом участке; б) на криволинейных участках

**Рисунок 2.17 – Зависимость коэффициента вертикальной динамики тележки нетормозного конца вагона для буксы 1 от скорости движения вагона**

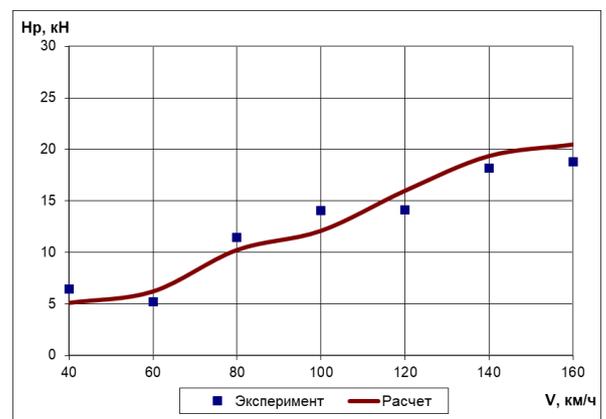
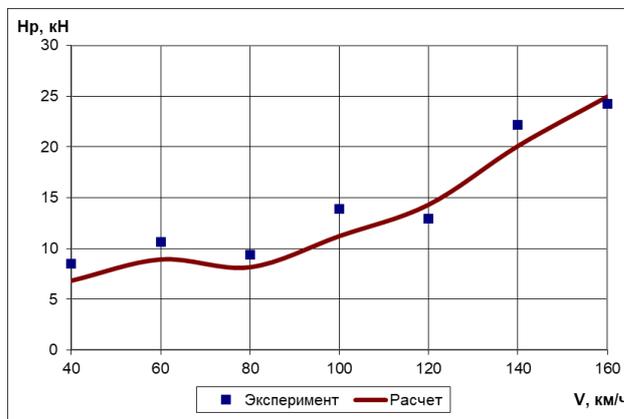


а

б

а) на прямом участке; б) на криволинейных участках

**Рисунок 2.18 – Зависимость коэффициента вертикальной динамики кузова нетормозного конца вагона от скорости движения вагона**

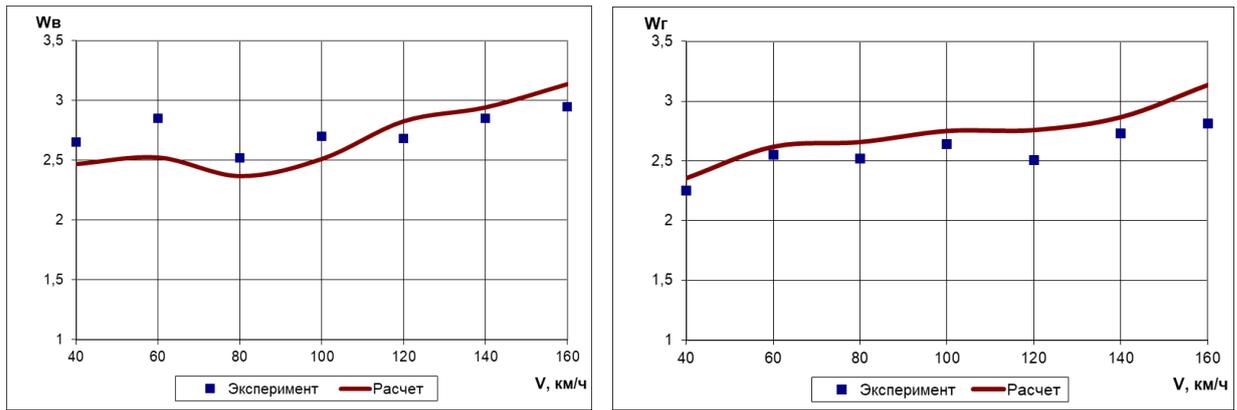


а

б

а) на прямом участке; б) на криволинейных участках

**Рисунок 2.19 – Зависимость боковой силы, действующей на раму тележки нетормозного конца вагона от скорости движения вагона**



а

б

*а) в вертикальном направлении; б) в горизонтальном направлении*

**Рисунок 2.20 – Зависимость показателя плавности хода в середине кузова от скорости движения вагона на прямом участке пути**

Анализ графиков, представленных на рисунках 2.15-2.20, показал, что значения экспериментальных и расчетных динамических показателей в рассматриваемом диапазоне скоростей движения качественно и количественно близки и максимальная разница значений в процентном соотношении составляет:

- для вертикальных ускорений при движении по прямому участку пути – 20,1 %; по стрелочному переводу – 18,3 %; по криволинейному участку – 19,1 %;
- для горизонтальных ускорений при движении по прямому участку пути – 19,7 %; по стрелочному переводу – 17,4 %; по криволинейному участку – 15 %;
- для коэффициента вертикальной динамики буксы тележки нетормозного конца вагона при движении по прямому участку пути – 20,4 %; по стрелочному переводу – 14,5 %; по криволинейному участку – 19,8 %;
- для коэффициента вертикальной динамики в подпятниковой зоне тележки нетормозного конца вагона при движении по прямому участку пути – 18 %; по стрелочному переводу – 15,3 %; по криволинейному участку – 20 %;
- для рамной силы подпятниковой зоны тележки нетормозного конца вагона при движении по прямому участку пути – 20 %; по криволинейному участку – 20,5 %;
- для показателя плавности хода в вертикальном направлении в середине кузова вагона при движении по прямому участку пути – 11,5 %; в горизонтальном направлении – 11,4 %.

## 2.8 Выводы по разделу 2

1 В качестве объекта исследования принят кузов пассажирского вагона модели 61-4447 производства ОАО «ТВЗ» как перспективного для отечественного рынка пассажирских вагонов.

2 Определены основные критерии выбора рациональной несущей конструкции кузова пассажирского вагона: масса, прочность, устойчивость сжатых элементов кузова, частота собственных изгибных колебаний, усталостная долговечность конструкции, позволяющие обеспечить безопасность движения, перспективные условия эксплуатации, работоспособность и надежность данного типа вагона в течение всего срока службы.

3 Для оценки выше указанных критериев разработаны компьютерные модели кузова пассажирского вагона объекта исследования: твердотельная и пластинчатая, дополненная тяжеловесным оборудованием, а также гибридная модель вагона.

4 Проведена верификация разработанных компьютерных моделей кузова пассажирского вагона. Твердотельная геометрическая модель кузова позволила оценить массу металлоконструкции, отличающуюся от реальной не более чем на 1,3%, что подтверждает ее пригодность для оценки металлоемкости несущей конструкции кузова. С целью дополнительной верификации пластинчатой модели разработана пластинчато-стержневая конечноэлементная модель кузова пассажирского вагона. Сопоставление данных полученных с использованием пластинчатой, пластинчато-стержневой модели и натурных экспериментов (значения нормальных напряжений в поперечном сечении кузова, первая собственная частота изгибных колебаний кузова) показало их удовлетворительное соответствие, что подтверждает адекватность результатов, получаемых с использованием пластинчатой модели, планируемой к использованию для расчетов по выбору рациональной несущей конструкции кузова пассажирского вагона. Разница значений показателей динамики кузова, полученных с использованием гибридной модели, с данными ходовых испытаний не превысила 21%, что подтверждает ее пригодность для оценки динамической нагруженности кузова.

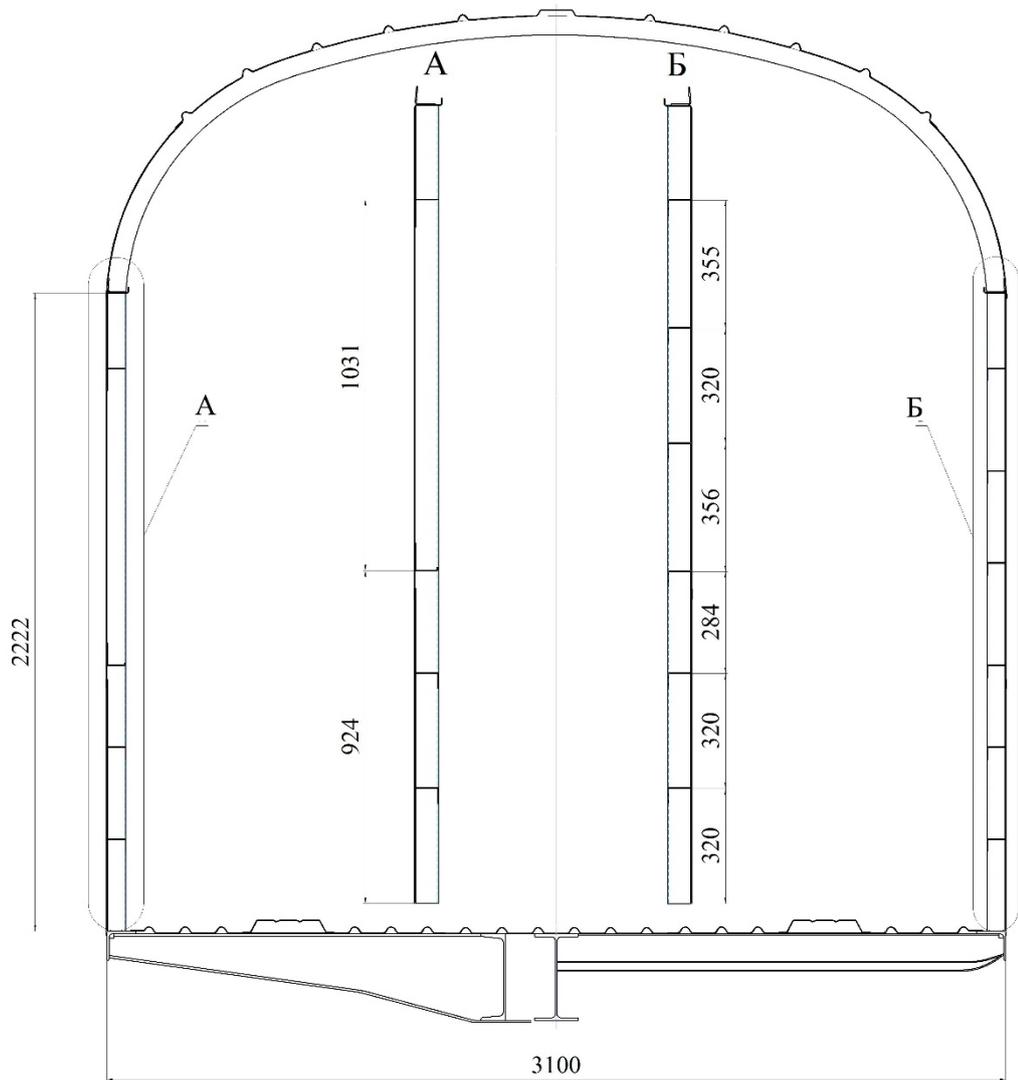
### **3 ВЫБОР ТИПА И ПАРАМЕТРОВ ПЕРФОРАЦИИ ПОДКРЕПЛЯЮЩЕГО НАБОРА КУЗОВА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА С НЕГОФРИРОВАННОЙ ОБШИВКОЙ БОКОВЫХ СТЕН**

#### **3.1 Разработка конечноэлементной модели кузова с негофрированной обшивкой боковых стен**

На основании проведенного обзора конструкций боковых стен пассажирских вагонов отечественного и зарубежного производства в первом разделе работы перспективной конструкцией для отечественного пассажирского вагоностроения является кузов вагона с негофрированной обшивкой боковых стен, подкрепленной стрингерами [154-159]. В несущей конструкции кузова вагона-аналога модели 61-4447 предлагается заменить гофрированные панели подоконного пояса, двухслойные панели надоконного пояса и межконных простенков на панели с негофрированной несущей обшивкой толщиной 1,5 мм, подкрепленной стрингерами в виде гнутого зетового профиля размером 40×65×45×2,5 мм. Выбор профиля произведен исходя из того, что он является типовым для подкрепляющих элементов кузовов пассажирских вагонов. С целью унификации кузова стойки также заменены на предлагаемый профиль.

Разработка конечноэлементной модели кузова вагона с негофрированной обшивкой боковых стен, подкрепленной стрингерами, выполнялась в среде программного комплекса, реализующего метод конечных элементов Siemens PLM Software NX, на основе пластинчатой конечноэлементной модели кузова вагона-аналога, дополненной элементами, моделирующими влияние внутреннего и навесного оборудования.

Количество и расположение стрингеров в кузове вагона выбрано в соответствии с мировым опытом проектирования несущих систем кузовов пассажирских вагонов и с учетом конструктивных особенностей боковой стены кузова вагона-аналога. Совмещение поперечного сечения кузова по шкворневому узлу и в средней части кузова представлено на рисунке 3.1.



**Рисунок 3.1 – Совмещение поперечного сечения кузова по шкворневому узлу и в средней части кузова**

Конечноэлементная модель вагона с негофрированной обшивкой боковых стен кузова и подкрепленная гнутыми зетовыми профилями, состоит из 136 тыс. трех- и четырехузловых пластинчатых конечных элементов и 1 тыс. пяти- и шестигранных объемных элементов, объединенных в 241 тыс. узлах. Характерный размер конечных элементов боковой стены – 60×60 мм. Число степеней свободы пластинчатой конечноэлементной модели составило 1449 тыс.

Нагружение конечноэлементной модели кузова вагона выполнено в соответствии с требованиями ГОСТ 34093 для трех основных режимов продольными, поперечными и вертикальными нагрузками. Учет боковых сил при расчете кузова по III расчетному режиму выполнен путем увеличения вертикальной нагрузки брутто на

12,5 %. Задание граничных условий модели кузова в пространстве выполнено аналогично описанному во втором разделе работы. Также дополнительно выполнен расчет конструкции от ремонтной нагрузки. В качестве ремонтной нагрузки принят подъем экипированного порожнего кузова по диагонали под места для домкратов в соответствии с ГОСТ 55182.

Значения нормальных и допускаемых напряжений для основных элементов конструкции кузова для каждого расчетного режима представлены в таблице 3.1.

**Таблица 3.1 – Максимальные нормальные и допускаемые напряжения в несущих элементах кузова пассажирского вагона с неогфрированной обшивкой боковых стен, МПа**

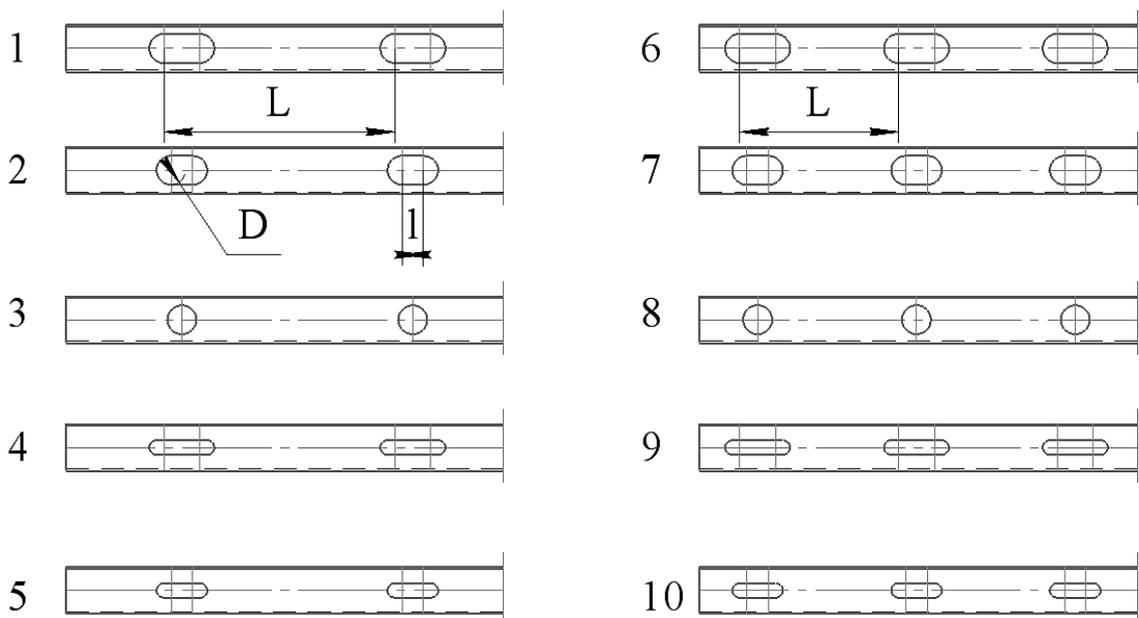
Элемент конструкции	I расчетный режим	II расчетный режим	Ремонтный расчетный режим	[ $\sigma$ ], I, II, ремонтный расчетные режимы	III расчетный режим		[ $\sigma$ ], III расчетный режим
	Сжатие	Растяжение			Растяжение	Сжатие	
Балки рамы	230	162	148	325	144	118	210
Настил пола	203	134	75	260	112	84	177
Обшивка боковой стены	129	99	157		73	51	
Стрингеры боковой стены	118	78	55		69	50	
Стойки боковой стены	93	66	192		67	88	
Дуги крыши	68	30	143		45	60	
Обшивка крыши	33	31	126		34	30	

На основании картины напряженно-деформированного состояния кузова и в соответствии с таблицей 3.1, можно сделать вывод, что все подкрепляющие элементы конструкции, за исключением балок рамы и стоек кузова в зоне установки домкратов, имеют значительный запас прочности для применения в них перфорации.

### 3.2 Разработка детализированных моделей кузовов вагонов с перфорированными подкрепляющими элементами

Поскольку железнодорожный подвижной состав эксплуатируется при интенсивном воздействии знакопеременных изменяемых во времени нагрузок, в их несущих конструкциях рационально применить круглые и продолговатые типы перфорации. С учетом геометрических особенностей конструкции целесообразным является использовать прямой ряд перфорации.

На основании отечественного и зарубежного опыта проектирования подвижного состава с перфорированными подкрепляющими элементами в работе для исследования приняты пять типов отверстий (четыре продолговатых и один круглый). Ввиду их геометрических размеров и конструктивных особенностей подкрепляющего набора кузова принято два значения шага перфорации. В связи с чем в работе разработано десять вариантов перфорации, располагаемых на стенке профиля, схемы которых представлены на рисунке 3.2, а параметры перфорации: диаметр отверстия ( $D$ ), расстояние между центрами отверстий ( $l$ ), шаг перфорации ( $L$ ) в таблице 3.2.



**Рисунок 3.2 – Схемы десяти вариантов перфорации несущих элементов на участке балки**

**Таблица 3.2 – Параметры перфорации несущих элементов кузова**

Вариант перфорации	Шаг перфорации L, мм	Диаметр отверстия D, мм	Расстояния между центрами отверстий l, мм
1	320	40	50
2		40	30
3		40	–
4		20	70
5		20	50
6	220	40	50
7		40	30
8		40	–
9		20	70
10		20	50

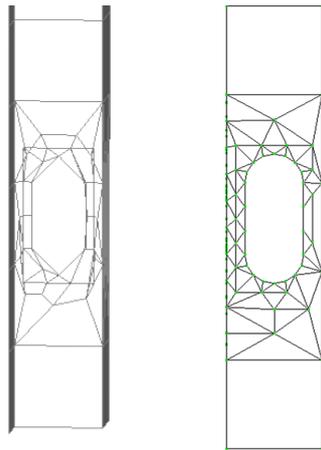
На основе оценки напряженно-деформированного состояния кузова с негофрированной обшивкой боковых стен можно сделать вывод, что свободная полка зетового профиля нагружена незначительно. Ввиду чего, с целью дополнительного уменьшения металлоемкости конструкции, предлагается помимо основной перфорации использовать на свободной полке профиля продолговатую перфорацию с размерами:  $D = 10$  мм,  $l = 30$  мм. Параметры дополнительной перфорации выбраны в соответствии с опытом проектирования отечественных пассажирских кузов вагонов.

Дальнейшей задачей работы является исследование вариантов конечноэлементных моделей кузова вагона с негофрированной обшивкой и применением перфорированных профилей на соответствие их несущих конструкций основным критериям выбора, установленным во втором разделе работы.

Оценка на соответствие критериям проводилась на основе компьютерного моделирования.

Для возможности оценки массы металлоконструкций кузовов вагонов с использованием различных вариантов перфорации подкрепляющих элементов на основании твердотельной модели кузова вагона-аналога сформированы десять вариантов твердотельных моделей несущей конструкции кузова в соответствии с вариантом перфорации.

Для оценки прочности, устойчивости и частоты собственных изгибных колебаний конструкции разработаны десять вариантов пластинчатых конечноэлементных моделей кузова вагона. Традиционное формирование расчетных конечноэлементных моделей с различными вариантами перфорации выполняется путем внесения соответствующих конструктивных изменений в исходную пластинчатую модель кузова вагона с негофрированной обшивкой боковых стен [160,161].



а

б

*а) автоматическое формирование сетки;*

*б) ручное формирование сетки*

**Рисунок 3.3 – Фрагмент перфорированной стойки модели кузова**

Применение автоматической генерации конечноэлементной сетки средствами программного комплекса в местах изменения геометрии балок приводит к формированию нерациональных размеров конечных элементов и вырождению отверстий перфорации.

В связи с чем в работе помимо автоматического применено ручное разбиение конечноэлементной сетки с ее сгущением у отверстия перфорации с применением преимущественно равносторонних треугольных и прямоугольных конечных элементов (рисунок 3.3).

В таблице 3.3 представлены характеристики пластинчатых конечноэлементных моделей кузовов вагонов в зависимости от варианта перфорации.

**Таблица 3.3 – Характеристики пластинчатых конечноэлементных моделей кузовов вагонов в зависимости от варианта перфорации несущих элементов**

Вариант перфорации	Количество элементов	Количество узлов	Общее число степеней свободы
1	317174	237717	1426302
2	312353	241712	1450272
3	325218	253789	1522734
4	323613	255390	1532340
5	317166	244945	1469670
6	348890	256734	1540404
7	343656	261868	1571208
8	357612	274705	1648230
9	355868	275732	1654392
10	348540	264436	1586616

Разработанные пластинчатые конечноэлементные модели состоят из трех- и четырехузловых конечных элементов, пяти- и шестигранных объемных элементов, а также абсолютно жестких одномерных элементов.

Моменты сопротивления перфорированных стоек боковой стены и дуг крыши для всех вариантов перфорации превышают минимальные значения, установленные ГОСТ 34093.

### **3.3 Исследование особенностей применения суперэлементного редуцирования для разработки расчетных моделей**

Выбор рационального варианта перфорации связан с проблемой создания многовариантных конечноэлементных расчетных моделей несущей конструкции кузова пассажирского вагона. Создание данных моделей предусматривает многократное внесение в конструкцию повторяющихся элементов – участков балок с перфорацией. В результате чего формируются однотипные модели несущей конструкции, отличающиеся друг от друга только вариантом перфорации.

На основании проведенного анализа методов многовариантных расчетов для создания детализированных пространственных моделей несущей конструкции кузова пассажирского вагона с различными вариантами перфорации несущих элементов рационально использовать метод суперэлементного редуцирования конструкции в NX Nastran [140].

Использование суперэлементов дает возможность анализировать модели большой размерности, такие как кузов вагона (в том числе, которые превышают возможности аппаратного обеспечения), и позволяет сделать выполнение анализа более эффективным за счет реализации большего количества циклов проектирования и итераций в анализе за то же проектное время.

Принцип, используемый в суперэлементном анализе, называют субструктурированием. То есть модель делится на серию компонентов (суперэлементов), каждый из которых обрабатывается независимо, что приводит к набору сокращенных матриц (масса, демпфирование, жесткость и нагрузка),

которые описывают поведение суперэлемента в местах его соединения с соседними структурами модели. После обработки всех суперэлементов эти уменьшенные матрицы собираются в так называемую остаточную структуру, и выполняется решение по сборке. Восстановление данных для каждого суперэлемента выполняется путем расширения решения в точках присоединения к основной структуре аналогично преобразованию, использованному при первоначальном редуцировании суперэлемента.

Структура суперэлементов может быть представлена узлами и элементами конечноэлементной сетки, может основываться на геометрии другого суперэлемента, а также присоединяться к модели извне как внешний суперэлемент.

Для разработки расчетных моделей кузовов вагонов с рассматриваемыми вариантами перфорации использованы суперэлементы из физических данных, представляющие собой конечноэлементные модели участка балки с отверстием перфорации. Данные участки балки разработаны для десяти вариантов перфорации и имеют узлы в характерных точках сетки для присоединения к основной конструкции кузова.

При статическом анализе теория, используемая в обработке суперэлементов, дает достоверные результаты.

При обработке массивов данных модели в NX Nastran входные параметры делятся на отдельный набор для каждого суперэлемента в соответствии с инструкциями пользователя.

Процесс разделения для основных массивов данных выглядит следующим образом: определяется порядок обработки для модели; массивы данных разбиваются на части для каждого суперэлемента в том же порядке, в котором происходит обработка. Все узлы сетки, назначенные суперэлементу, удаляются из основных данных массива и помещаются в отдельную область для суперэлемента; все элементы, соединенные с внутренними узлами сетки суперэлемента, удаляются; создаются копии из всех внешних узлов сетки, которые не являются внутренними, но связаны элементами, содержащимися в суперэлементе. Любые

загрузки, относящиеся к узлам внутренней сетки и/или внутренним элементам, удаляются из массива данных. Любая информация, удаленная из массива данных для суперэлемента, недоступна для использования в любом другом суперэлементе; после определения всей информации для первого суперэлемента процесс повторяется для следующего суперэлемента. После того, как массивы данных разделены для всех суперэлементов, все оставшиеся данные принадлежат остаточной структуре. Затем каждый суперэлемент обрабатывается с использованием собственных уникальных массивов данных.

Суперэлементу задаются степени свободы аналогично элементу, как при обычном анализе, которые образуют G-множество. Последовательно формируются M- и N-множества, включающие в себя MPC (многоузловые ограничения) и R-элементы (жесткие связи) и так далее. Отличительной особенностью для суперэлемента является определение внешних степеней свободы, в которых суперэлемент прикрепляется к основной модели, которые определяются как A-множество. Они являются привязанными к суперэлементу и используются для дальнейшего анализа. Сокращение структурных матриц суперэлемента происходит до того момента, пока не останутся члены, относящиеся к A-множеству. Данные матрицы описывают свойства суперэлемента в модели.

Все степени свободы суперэлемента, которые не являются внешними, называются внутренними (O-множество). Эти степени свободы конденсируются из матриц во время процесса восстановления. Значения параметров с внутренних степеней свободы передаются на внешние.

По завершении обработки всех MPC, R-элементов и SPC (ограничения, применяемые к узлам сетки) запускается процесс восстановления с матриц суперэлементов. Множество степеней свободы, оставшихся в узле, относятся к F-набору (степени свободы, которые не ограничены), который содержит O- и A-множества в качестве подмножеств.

Статическое уравнение для F-множества:

$$K_{ff}U_f = P_f. \quad (3.1)$$

Это уравнение может быть переписано как

$$\begin{bmatrix} K_{oo} & K_{oa} \\ K_{oa1}^T & \bar{K}_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_o \\ U_a \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_o \\ \bar{P}_a \end{Bmatrix}, \quad (3.2)$$

где черта над термином  $\bar{P}_a$  указывает, что подматрица является ассоциативной матрицей для этого набора перед операцией сокращения. Выделив верхнюю часть уравнения, мы получим

$$[K_{oo}]\{U_o\} + [K_{oa}]\{U_a\} = P_o. \quad (3.3)$$

Если умножить полученное уравнение на  $[K_{oo}]^{-1}$ , получим

$$\{U_o\} = -[K_{oo}]^{-1}[K_{oa}]\{U_a\} + [K_{oo}]^{-1}\{P_o\}. \quad (3.4)$$

Матрица статического преобразования границ между внешним и внутренним движением называется  $G_{ot}$  и определяется как

$$G_{ot} = -K_{oo}^{-1}K_{ot}. \quad (3.5)$$

Физически эта матрица представляет решение задачи о граничном движении. То есть каждый столбец этой матрицы представляет единичное движение границы степени свободы внутренних узлов при ограниченности движения других.

То есть, в матрице преобразования каждый столбец соответствует внешней степени свободы суперэлемента (А-множество), а каждая строка соответствует внутренней степени свободы (О-множество).

Смещения с фиксированной границей суперэлемента определяются как:

$$U_o^o = K_{oo}^{-1}P_o. \quad (3.6)$$

Полученная матрица является статическим решением перемещения суперэлемента при установленном закреплении и нагружении модели. Поэтому общее смещение внутренних узлов может быть определено как

$$U_o = U_o^o + G_{ot}U_t, \quad (3.7)$$

где  $U_t$  - решение для смещений внешних (граничных) узлов.

Подставив уравнение для  $U_o$  в нижней части уравнения (3.2), получим

$$K_{ot}^T[G_{ot}U_t + U_o^o] + \bar{K}_{tt}U_t = \bar{P}_t. \quad (3.8)$$

Из этого выражения получают приведенные матрицы жесткости и нагружения для суперэлемента. Приведенная жесткость  $K_{tt}$  определяется как

$$K_{tt} = K_{ot}^T G_{ot} + \bar{K}_{tt} \quad (3.9)$$

и приведенная нагрузка  $P_t$  определяется как

$$P_t = G_{ot}^T P_o + \bar{P}_t. \quad (3.10)$$

Каждый суперэлемент обрабатывается таким образом, и связанные с ним матрицы сокращаются до внешних степеней свободы. После обработки всех суперэлементов, когда обрабатывается остаточная структура, сокращенные матрицы объединяются в системную матрицу. Остаточная структура включает в себя все компоненты модели, не назначенные суперэлементу, совместно со сборкой сокращенных матриц суперэлемента.

Собранные матрицы используются для решения остаточной структуры. Получив решение для сборки, получаем граничное решение для каждого суперэлемента. Посредством данного граничного решения определяются внутренние смещения суперэлементов, и становится возможным стандартное восстановление данных для суперэлементов и остаточной структуры. Любой вывод, который доступен в стандартном (не суперэлементном) анализе, доступен и в суперэлементном анализе. Разница в том, что вывод результатов при суперэлементном анализе разделен на суперэлементы.

Для выполнения суперэлементного решения модели суперэлементы должны быть определены в разделе основных данных. Если суперэлементы не определены, предполагается, что модель является моделью только с остаточной структурой, и выполняется традиционное (не суперэлементное) решение. Существует два метода определения суперэлементов: суперэлементы основного массива данных и суперэлементы секционированных массивов данных.

Когда суперэлементы определяются по методу основного объема данных, модель делится на отдельные компоненты, и каждый компонент является суперэлементом.

Каждый суперэлемент секционированных массивов данных определен в своем собственном разделе многораздельных данных. Каждый из отдельных разделов массивов данных содержит информацию о конкретном компоненте сборки: геометрию, элементы, свойства, ограничения и нагрузки. Если используется суперэлемент секционированных массивов данных, то программные

процессы протекают так же, как процесс сборки. А именно ряд отдельных компонентов является частью конечноэлементной модели.

Внешний суперэлемент хранится во внешнем файле и представляет из себя уменьшенное представление полной компонентной модели с граничными условиями. Приведенное граничное представление для внешнего суперэлемента включает в себя: граничные матрицы, такие как жесткость, масса и т. д., записываются в терминах степеней свободы граничных точек; геометрические координаты граничных точек; выходные матрицы преобразования.

После создания одного или нескольких внешних суперэлементов во время компонентных решений возможно затем объединение их с остаточной структурой в системном решении.

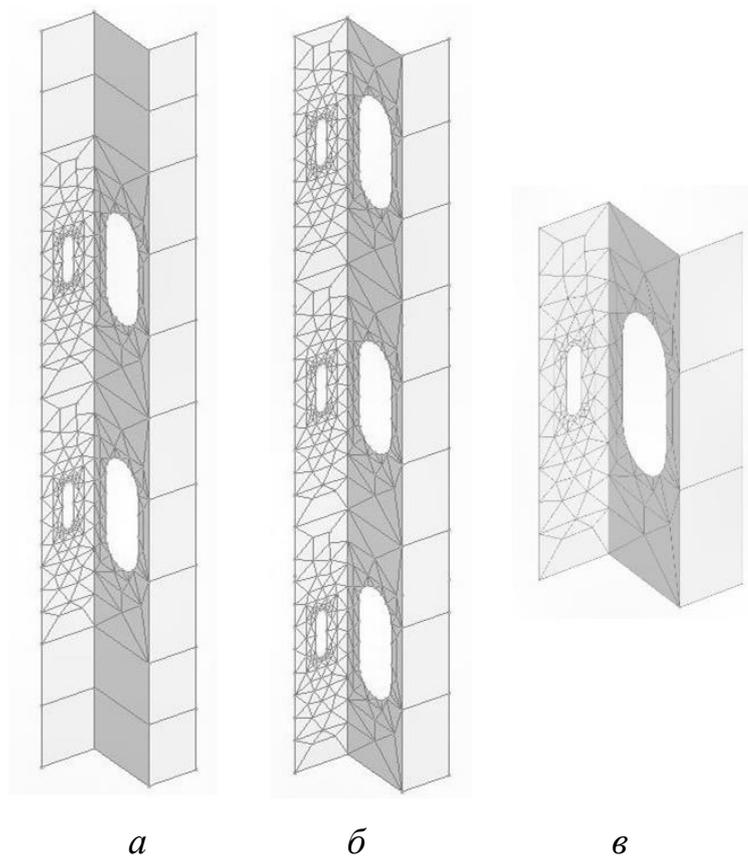
Все эти методы могут использоваться независимо или вместе.

### **3.4 Разработка конечноэлементных моделей кузова с перфорированными подкрепляющими элементами методом суперэлементного редуцирования**

При суперэлементном редуцировании важной задачей является выделение рационального блока конечноэлементной модели с перфорацией, предполагаемого для многократного применения в конструкции [162,163].

С учетом анализа разработанной конечноэлементной модели с негофрированной обшивкой боковых стен, подкрепленной стрингерами, описанной разделе 3.1, возможны несколько вариантов выделения блока модели, который может использоваться в качестве суперэлемента. Это типовой участок балки с различными вариантами шага перфорации (рисунок 3.4, а, б) либо обособленный участок с одним отверстием (рисунок 3.4, в).

В кузове пассажирского вагона существует несколько типовых участков балок, что предполагает создание нескольких типов суперэлементов, дополнительная разработка суперэлементов требуется для балок в концевых частях вагона, что увеличивает время разработки конструкции в целом.



*а) с шагом перфорации  $L_1$ ; б) с шагом перфорации  $L_2$ ; в) обособленный участок с одним отверстием*

**Рисунок 3.4 – Схемы конечноэлементной модели участка стрингера межоконного простенка, используемые в качестве суперэлемента**

В качестве универсального суперэлемента выступает обособленный участок балки с одним отверстием, позволяющий комбинировать на отрезке балки несколько суперэлементов для достижения требуемого результата. Габаритные размеры универсального участка балки должны вмещать в себя максимальный исследуемый размер перфорации. Обособленный участок балки с одним отверстием перфорации был использован в работе в качестве суперэлемента. Также целесообразным является использование в качестве суперэлемента участка профиля, в котором непосредственно имеются отверстия перфорации (свободные участки профиля).

Для использования суперэлементов в конструкции разработанная стрингерная конечноэлементная модель кузова пассажирского вагона модифицировалась. Для этого в конструкции определены зоны расположения суперэлементов, в балках, дугах и стрингерах удалены конечные элементы и узлы конечноэлементной сетки

выставлены в соответствии с узлами суперэлемента. Подготовлены две модели кузова в соответствии с шагом перфорации.

Длина модели участка балки используемого в качестве суперэлемента составила 146 мм. При шаге перфорации 320 мм в расчетной модели использованы четыре суперэлемента: два для боковой стены и два для дуг крыши в соответствии с ее радиусом. При шаге перфорации 220 мм дополнительно использованы два суперэлемента с шириной конечных элементов по краям элемента 40 мм и 45 мм для возможности подсоединения к стойкам боковой стены.

При суперэлементном расчете модели кузова вагона для каждой модели участка балки в соответствии с вариантом перфорации, предполагаемой к использованию в качестве суперэлемента, определяются внешние степени свободы, по отношению к которым она редуцируется (внешние узлы в характерных точках присоединения к основной структуре модели). Производится суперэлементный расчет модели участка балки. На итоговой стадии разработки модели кузова вагона осуществляется добавление нужного суперэлемента в качестве компонента сборки в основную модель. Сокращение времени на разработку многовариантных моделей достигается за счет замены исходного файла суперэлемента на аналогичный с другим вариантом перфорации.

В таблице 3.4 представлены характеристики пластинчатых конечноэлементных моделей кузовов вагонов с использованием суперэлементов.

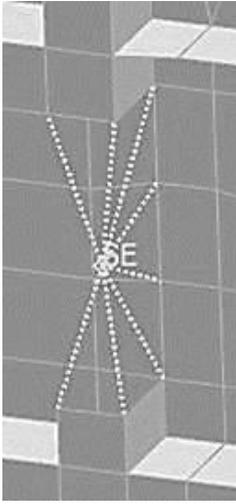
**Таблица 3.4 – Характеристики пластинчатых конечноэлементных моделей кузовов вагонов с использованием суперэлементов**

Вариант перфорации	Количество элементов	Количество узлов	Общее число степеней свободы
1-5	129086	126235	825954
6-10	136533	133809	900198

В соответствии с данными, представленными в таблице 3.4., при использовании суперэлементов для расчета происходит сокращение размерности модели за счет исключения внутренних степеней свободы. Число степеней свободы сократилось на 55%, количество узлов – на 50%, количество элементов – на 40%.

Фрагмент конечноэлементной модели стойки кузова пассажирского вагона с использованием суперэлемента представлен на рисунке 3.5.

Адекватность разработанных конечноэлементных моделей кузовов вагонов подтверждена качественным и количественным соответствием полученных результатов расчета с использованием суперэлементов с результатами расчета модели, сформированной традиционным способом. Расхождение значений напряжений не превысило 1%, что подтверждает работоспособность конструкций, разработанных с использованием суперэлементов.



**Рисунок 3.5 –  
Фрагмент  
конечноэлементной  
модели стойки кузова  
пассажирского вагона  
с использованием  
суперэлемента  
(символьное  
отображение)**

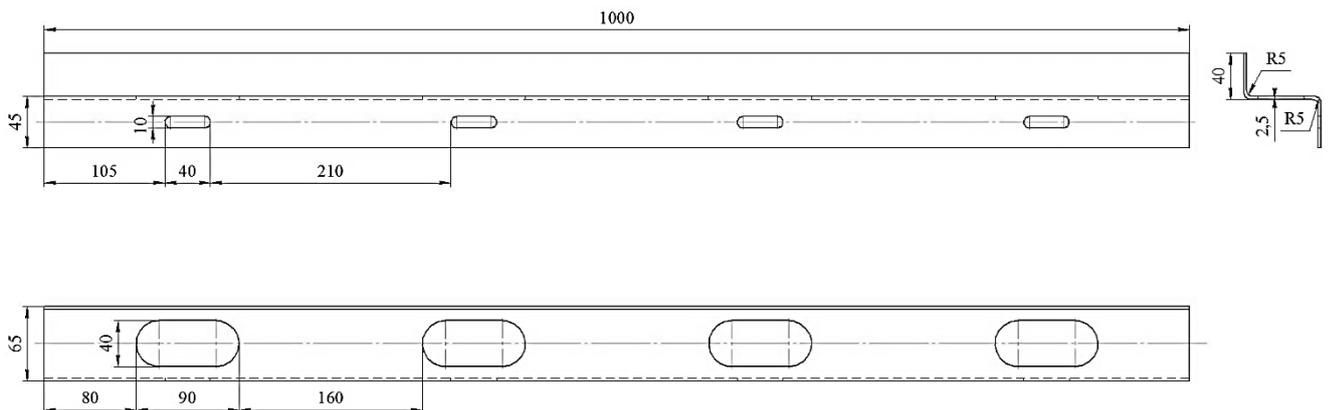
Метод суперэлементного редуцирования конструкции позволяет разработать требуемое количество типовых расчетных моделей с меньшими временными и трудовыми затратами инженера в сравнении с традиционным методом разработки, что является предпочтительным для решения инженерных поисковых задач.

### **3.5 Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния перфорированной и сплошной балок**

С целью подтверждения адекватности детализированных пространственных расчетных моделей кузовов пассажирских вагонов с неогфрированной обшивкой боковых стен, подкрепленных перфорированными стрингерами, необходимо провести экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования кузова в целом, а также больших блоков несущей конструкции не представляются возможными ввиду высокой стоимости, сложности эксперимента и больших временных затрат, связанных с необходимостью создания такого кузова. В связи с чем, целесообразно провести испытания балки, предполагаемой к использованию

в конструкции. Использование отдельного элемента конструкции позволяет исключить возможность влияния на результаты эксперимента дополнительных факторов, например, таких как геометрическая нелинейность и сварные швы. Кроме того, упрощенный вариант позволяет облегчить закрепление и нагружение исследуемого элемента [164].

Экспериментальная оценка прочностных характеристик выполнялась для двух метровых экспериментальных образцов, изготовленных методом гибки. Первый образец выполнен сплошным, второй – перфорированным. Отверстия перфорации в балке выполнены методом лазерной резки. Перфорация профиля соответствует шестому варианту (таблица 3.2). Геометрические размеры экспериментального образца на примере перфорированного профиля представлены на рисунке 3.6.

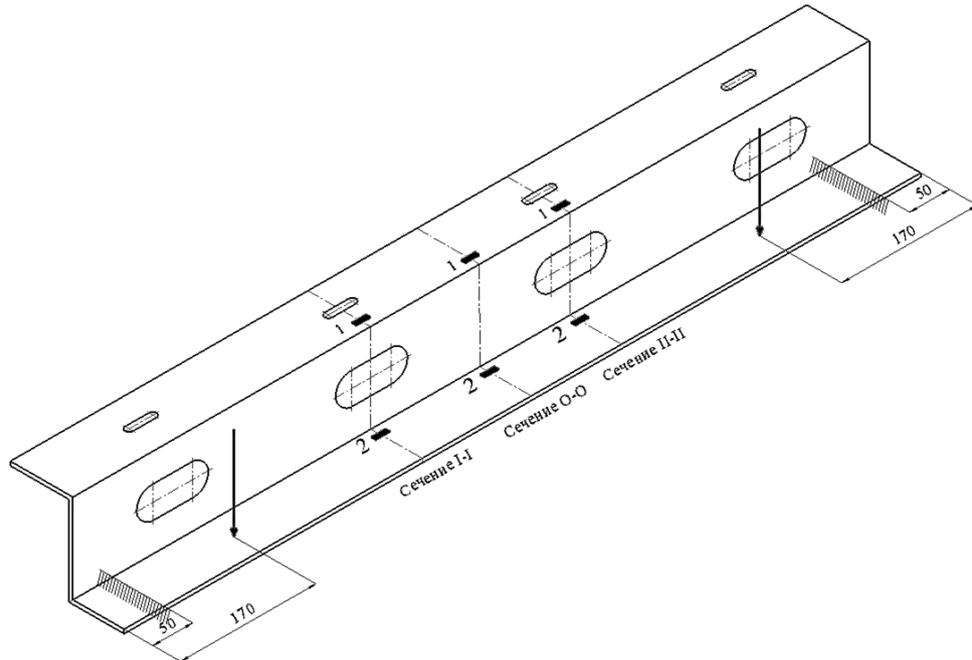


**Рисунок 3.6 – Геометрические размеры перфорированного зетового профиля**

Исследование напряженно-деформированного состояния профилей выполнялось методом натурной тензометрии в соответствии с ГОСТ Р 52728 на специальном оборудовании с использованием тензорезисторов на основе тонких пленок типа TML.

Для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния балок предварительно была разработана схема установки тензорезисторных датчиков. Выбраны три типовых сечения, удаленные от зон концентрации напряжений для возможности сопоставления с аналитическими результатами. Исходя из возможностей экспериментальной базы и упрощения

аналитического расчета, схема закрепления и нагружения балок с указанием исследуемых сечений и установки тензометрических датчиков была принята следующей (рисунок 3.7) на примере профиля с перфорацией.



**Рисунок 3.7 – Схема нагружения перфорированного профиля с указанием исследуемых сечений**

Сечение 0-0 располагалось по среднему сечению балки между отверстиями перфорации, сечение I-I и сечение II-II располагались по средним сечениям отверстий перфорации, располагаемых слева и справа от оси симметрии балки. Закрепление и нагружение для сплошного профиля выполнялись аналогично, схема установки датчиков соответствует схеме установке датчиков на перфорированном профиле.

Перед испытанием была произведена наклейка тензоризистроных датчиков, распайка и проверка кабелей измерительных систем и разъемов аппаратуры, а также тарировка приборов. Испытательное оборудование и средства измерений, используемые в эксперименте, прошли поверку в соответствующем порядке. Экспериментальное исследование проводилось при температуре воздуха от плюс 20 до плюс 23°C при атмосферном давлении от 725 до 733 мм рт. ст.

Прочностные испытания балок проводились в статической постановке на испытательной машине ЦД-40 (рисунок 3.8), реализующей испытательную нагрузку в пределах 400 кН.



*а*

*б*

*а) сплошного зетового профиля; б) перфорированного зетового профиля*  
**Рисунок 3.8 – Экспериментальное исследование балок в испытательной машине ЦД-40**

Балка нагружалась ступенчато двумя поперечным усилиями, приложенным симметрично на расстоянии 660 мм друг от друга. Шаг нагружения составлял 500 Н. За время испытания для каждой балки выполнено семь ступеней нагружения. Вес нагрузки фиксировался гензорезисторным датчиком М170К-30-С1.

Регистрация контролируемых параметров выполнялась в реальном времени с использованием цифровых технологий.

Приборы, участвующие в эксперименте, позволяют оперативно регистрировать, преобразовывать и обрабатывать полученную информацию (рисунок 3.9). В основе применяемого измерительного комплекса заложена микропроцессорная многоканальная тензометрическая система. Напряжения определялись как следствие изменения электрического сопротивления датчика при его деформировании.

Результаты прочностных испытаний по трем исследуемым сечениям двух рассматриваемых профилей представлены в таблицах 3.5, 3.6.

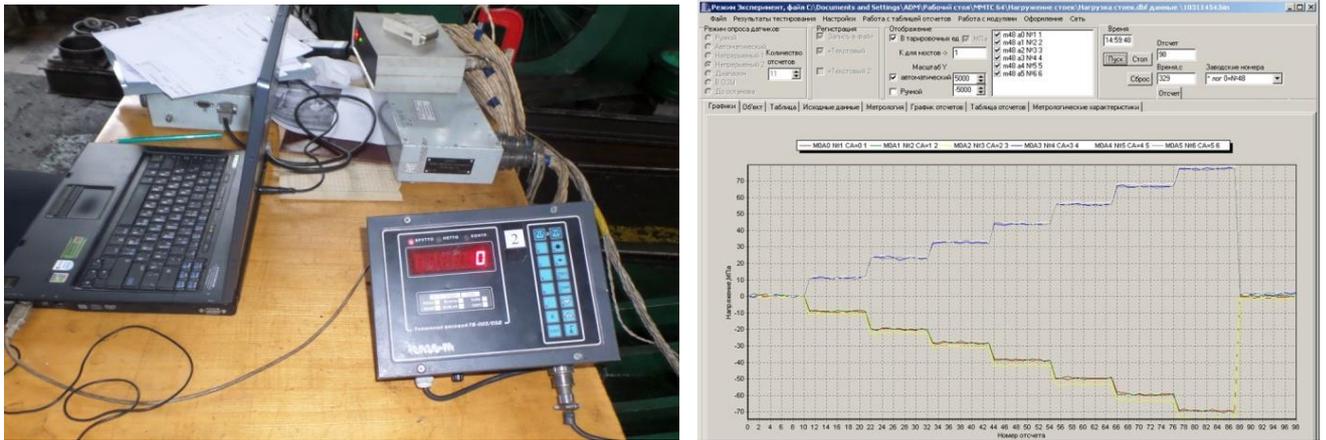


Рисунок 3.9 – Измерительный комплекс. Регистрация напряжений

Таблица 3.5 – Экспериментальные напряжения в сплошном профиле, МПа

№ п/п	Нагрузка, Н	Номер датчика					
		Сечение I-I		Сечение O-O		Сечение II-II	
		1	2	1	2	1	2
1	480	-11	11	-10	11	-10	10
2	1030	-23	23	-22	24	-21	23
3	1451	-31	33	-30	33	-29	33
4	1991	-44	45	-42	46	-40	45
5	2550	-57	58	-54	60	-54	59
6	2971	-65	67	-62	69	-61	68
7	3530	-77	79	-74	81	-72	80

Таблица 3.6 – Экспериментальные напряжения в перфорированном профиле, МПа

№ п/п	Нагрузка, Н	Номер датчика					
		Сечение I-I		Сечение O-O		Сечение II-II	
		1	2	1	2	1	2
1	441	-11	15	-9	10	-12	15
2	1089	-28	35	-23	26	-28	35
3	1471	-39	48	-33	36	-39	49
4	2148	-57	69	-48	51	-56	69
5	2638	-71	85	-60	63	-70	85
6	3089	-80	96	-67	71	-80	97
7	3423	-90	108	-76	80	-89	109

Анализ приведенных в таблицах 3.5 и 3.6 результатов позволяет сделать следующие выводы:

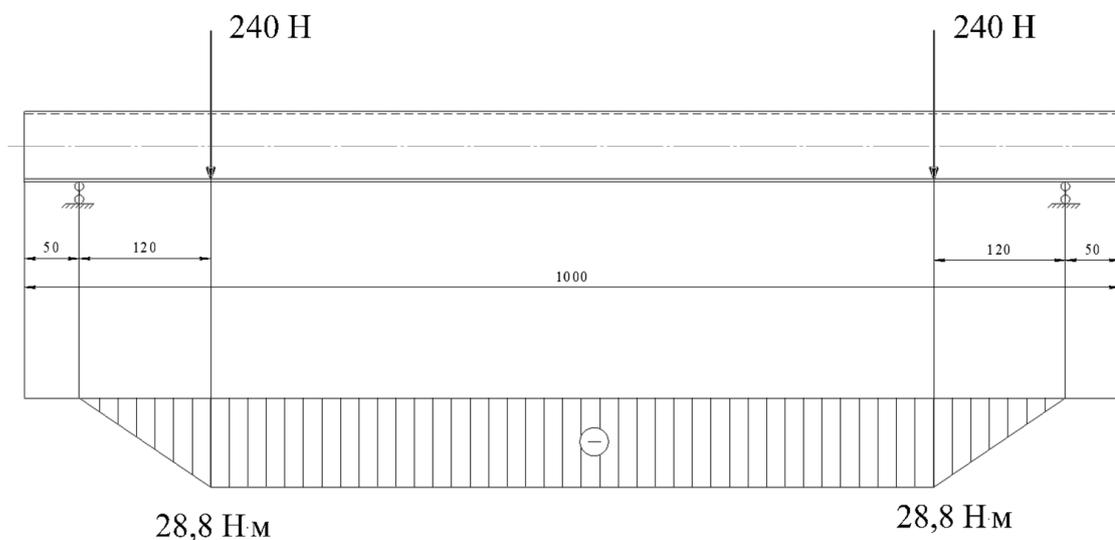
– максимальные напряжения в профиле с перфорацией в сечениях I-I и II-II по отверстиям перфорации превышают напряжения в той же области профиля

сплошного сечения в пределах 37% (разница нагрузок не более 5%), а при первом цикле нагружения при максимальной разнице нагрузок в 9% превышение напряжения составляет 50%;

- в среднем сечении балки максимальные напряжения в сплошном и перфорированном профилях близки по значению, их разница не превышает 11%;

- значения напряжений по сечениям I-I и II-II балки перфорированного профиля превышают значения напряжений в среднем сечении балки не более, чем на 37%, а при первом цикле нагружения – на 50%.

Для подтверждения результатов эксперимента был произведен графоаналитический метод расчета балки на двух опорах от действия нормальной силы. Расчетная схема с эпюрой изгибающего момента  $M$  от действия нормальной силы величиной 480Н в профиле сплошного сечения в качестве примера представлена на рисунке 3.10.



**Рисунок 3.10 – Расчетная схема. Эпюра изгибающего момента**

Ввиду того, что плоскость приложения силы не совпадает с главными плоскостями инерции зетового профиля, в эксперименте наблюдается частный случай сложного сопротивления – косой изгиб.

Изгибающий момент в поперечном сечении профиля раскладывается на две составляющие, действующие в главных плоскостях инерции:

$$M_{x_0} = M \cdot \cos \alpha \quad M_{y_0} = M \cdot \sin \alpha \quad (3.11)$$

где  $\alpha$  – угол наклона главных осей;

$x_0, y_0$  – главные оси.

В данном случае нормальные напряжения  $\sigma_N$  для точек сечения с координатами  $x_0, y_0$  находятся по формуле:

$$\sigma_N = \pm \frac{M_{x_0}}{J_{x_0}} \cdot y_0 \pm \frac{M_{y_0}}{J_{y_0}} \cdot x_0, \quad (3.12)$$

где  $J_{x_0}, J_{y_0}$  – главные осевые моменты инерции сечения элемента. Геометрические характеристики сечения гнутого зетового профиля взяты в соответствии с ГОСТ 13229.

Сопоставление результатов экспериментального метода расчета с результатами аналитического метода расчета представлено в таблице 3.7.

**Таблица 3.7 – Сопоставление результатов экспериментального (Э) и аналитического (А) методов расчетов, МПа**

№ п/п	Нагрузка, Н	Метод расчета	Номер датчика					
			Сечение I-I		Сечение O-O		Сечение II-II	
			1	2	1	2	1	2
1	480	Э	-11	11	-10	11	-10	10
		А	-11	11	-11	11	-11	11
2	1030	Э	-23	23	-22	24	-21	23
		А	-24	23	-24	23	-24	23
3	1451	Э	-31	33	-30	33	-29	33
		А	-33	33	-33	33	-33	33
4	1991	Э	-44	45	-42	46	-40	45
		А	-46	45	-46	45	-46	45
5	2550	Э	-57	58	-54	60	-54	59
		А	-59	58	-59	58	-59	58
6	2971	Э	-65	67	-62	69	-61	68
		А	-68	67	-68	67	-68	67
7	3530	Э	-77	79	-74	81	-72	80
		А	-81	80	-81	80	-81	80

Разница значений результатов экспериментального метода расчета с результатами аналитического метода расчета не превысила 10%.

На следующем этапе работы с целью подтверждения адекватности используемых в работе методов оценки напряженно-деформированного состояния подкрепляющих элементов кузова проведено сопоставление экспериментальных результатов расчетов и результатов, полученных с использованием МКЭ.

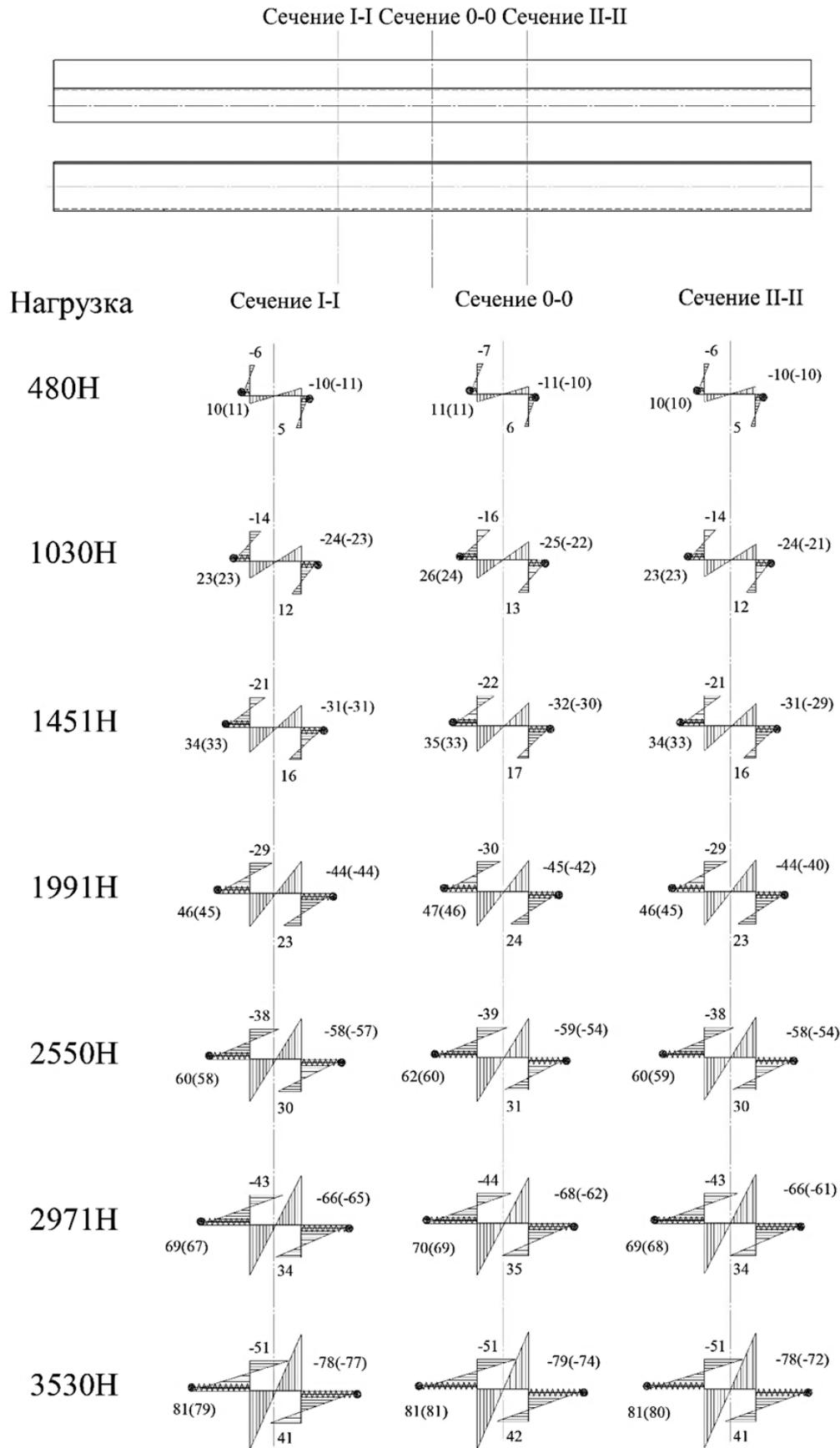
### **3.6 Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния перфорированной и сплошной балок**

Для теоретической оценки напряженно-деформированного состояния сплошной и перфорированной балок были разработаны их компьютерные модели, описывающие экспериментальное исследование в среде программного комплекса Siemens PLM Software NX.

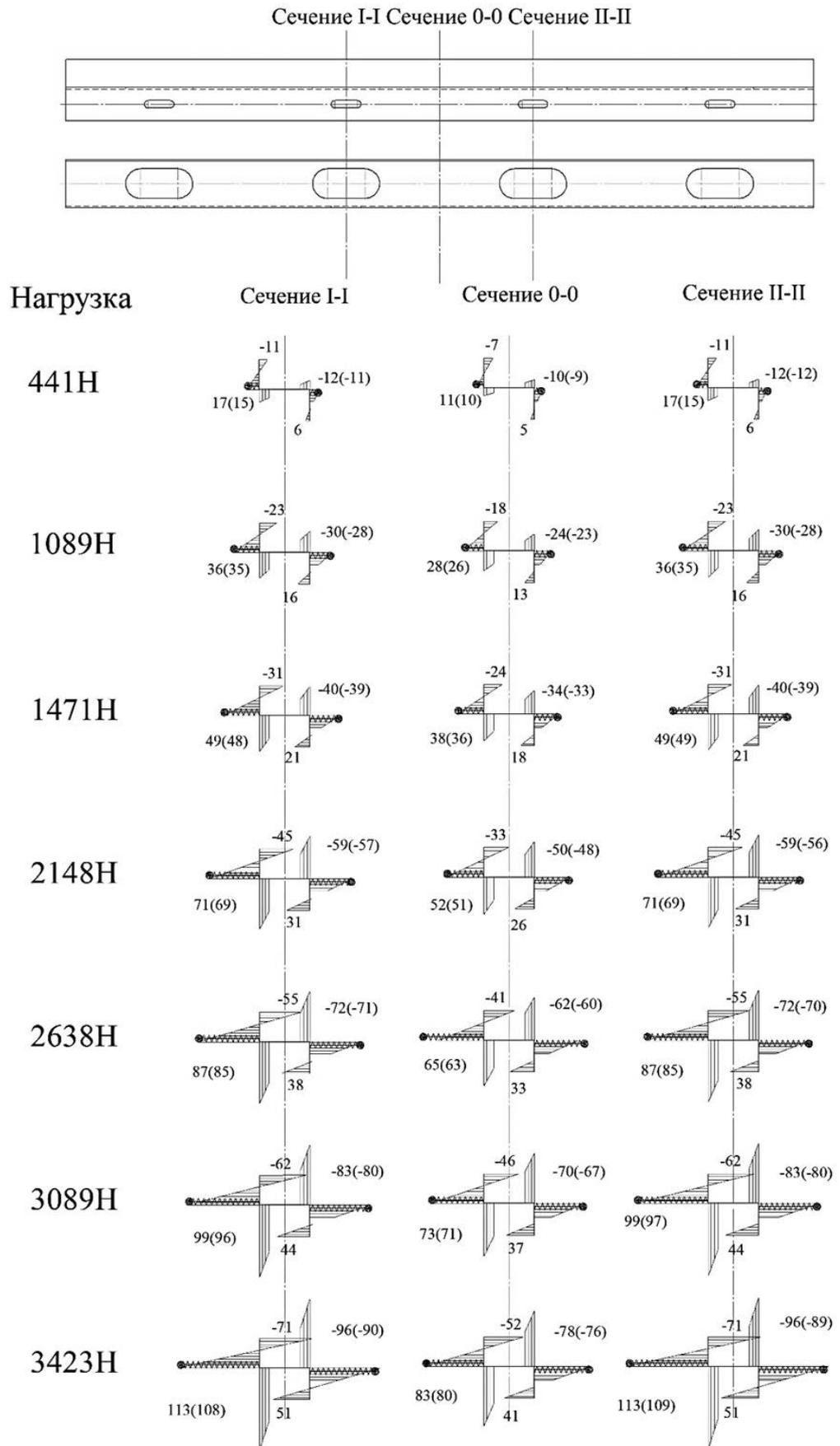
Конечноэлементные модели выполнялись пластинчатыми, преимущественно четырехузловыми конечными элементами со средним размером стороны конечного элемента 3 мм. Расчетные модели перфорированного и сплошного профиля сформированы соответственно 14,8 тыс. и 16,7 тыс. пластинчатыми элементами. Характеристики упругих свойств материала приняты в соответствии с экспериментальным образцом. Нагружение и закрепление балок выполнено в соответствии с натурными испытаниями (рисунок 3.7).

Результаты математического расчета напряженно-деформированного состояния профилей по трем исследуемым сечениям, а также сопоставление экспериментальных и расчетных напряжений представлены на рисунках 3.11, 3.12. Значения напряжений, полученные при натурных испытаниях, указаны цифрами в скобках.

Анализируя полученные результаты экспериментальных и компьютерных исследований, можно сделать вывод, что значения напряжений, полученных МКЭ, соответствуют экспериментальным значениям и не превышают их более, чем на 10%. В связи с чем расчетная модель пассажирского вагона с перфорированными профилями может быть использована для исследования напряженно-деформированного состояния конструкции.



**Рисунок 3.11 – Эпюры нормальных напряжений от действия вертикальной нагрузки в зетовом профиле без перфорации, МПа**



**Рисунок 3.12 – Эпюры нормальных напряжений от действия вертикальной нагрузки в перфорированном зетовом профиле, МПа**

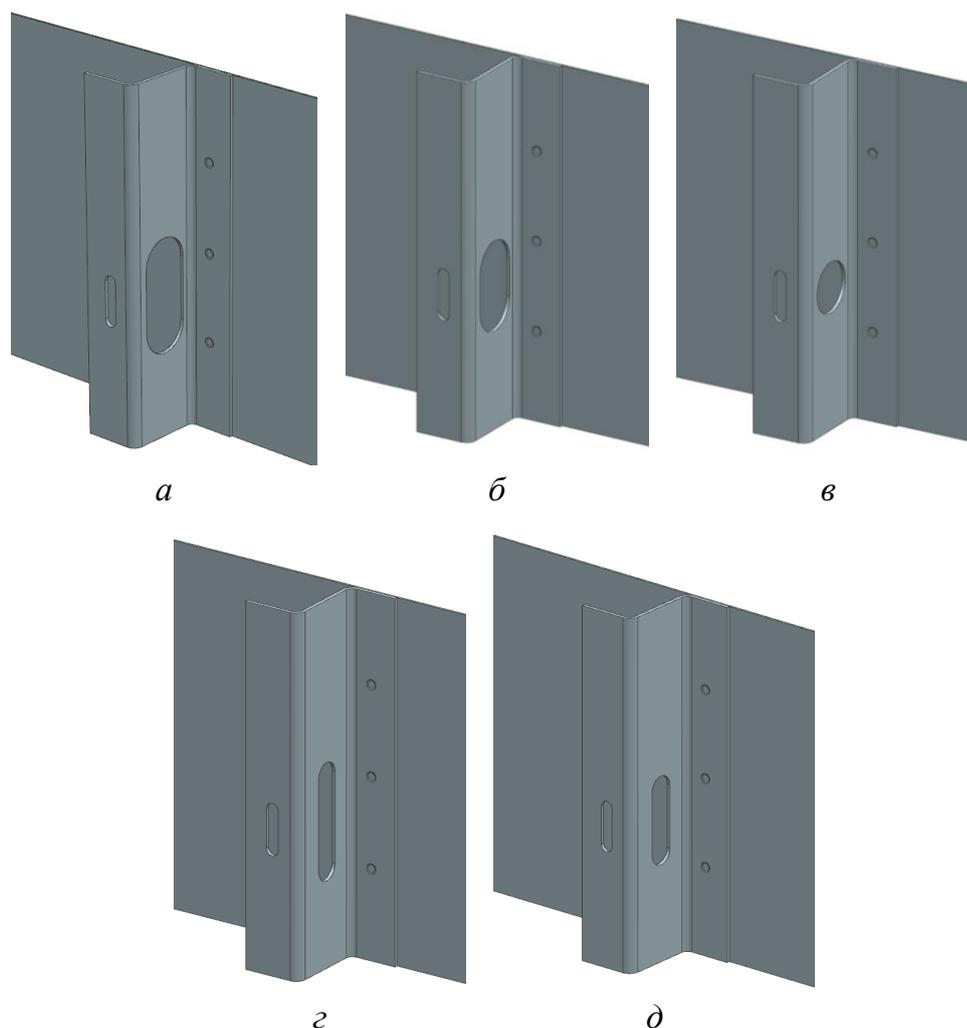
### **3.7 Уточненная конечноэлементная модель зоны обшивки с перфорированным подкрепляющим элементом**

Детальное исследование перфорированного подкрепляющего элемента при взаимодействии с обшивкой с использованием пластинчатых конечноэлементных моделей при достаточной степени дискретизации модели кузова пассажирского вагона не позволяет оценить особенности работы подкрепляющего элемента в зоне отверстий перфорации. Учет данных особенностей возможен применением объемных конечноэлементных моделей, созданных из элементов типа Solid.

Использование конечноэлементной модели кузова вагона полностью из объемных элементов приводит к значительному увеличению ее размерности и невозможности ее анализа из-за ограниченности компьютерных ресурсов. Для уменьшения размерности расчетной модели целесообразно использовать метод последовательного выделения областей [165]. Данный метод позволяет выделить из общей конечноэлементной модели кузова вагона область, для которой требуется детальное исследование. При вычленении области конструкции возможно обеспечить ее моделирование объемными элементами и достаточную детализацию для моделирования сварного соединения. Взаимодействие выделенного фрагмента с общей конструкцией моделируется путем введения в граничные узлы усилий, полученных в соответствующих узлах пластинчатой конечноэлементной модели.

В соответствии с методикой описанной выше, для оценки напряженно-деформированного состояния участка боковой стены кузова пассажирского вагона с негофрированной обшивкой боковых стен выделен фрагмент наиболее нагруженной стойки с перфорацией и приваренной к ней обшивкой, взятый в сечении кузова ближайшем к срединному по подоконному поясу обшивки. На рисунке 3.13 представлены геометрические модели выделенной зоны обшивки со стойками с пятью вариантами перфорации.

Соединение обшивки с подкрепляющими ее элементами осуществляется контактной точечной сваркой.



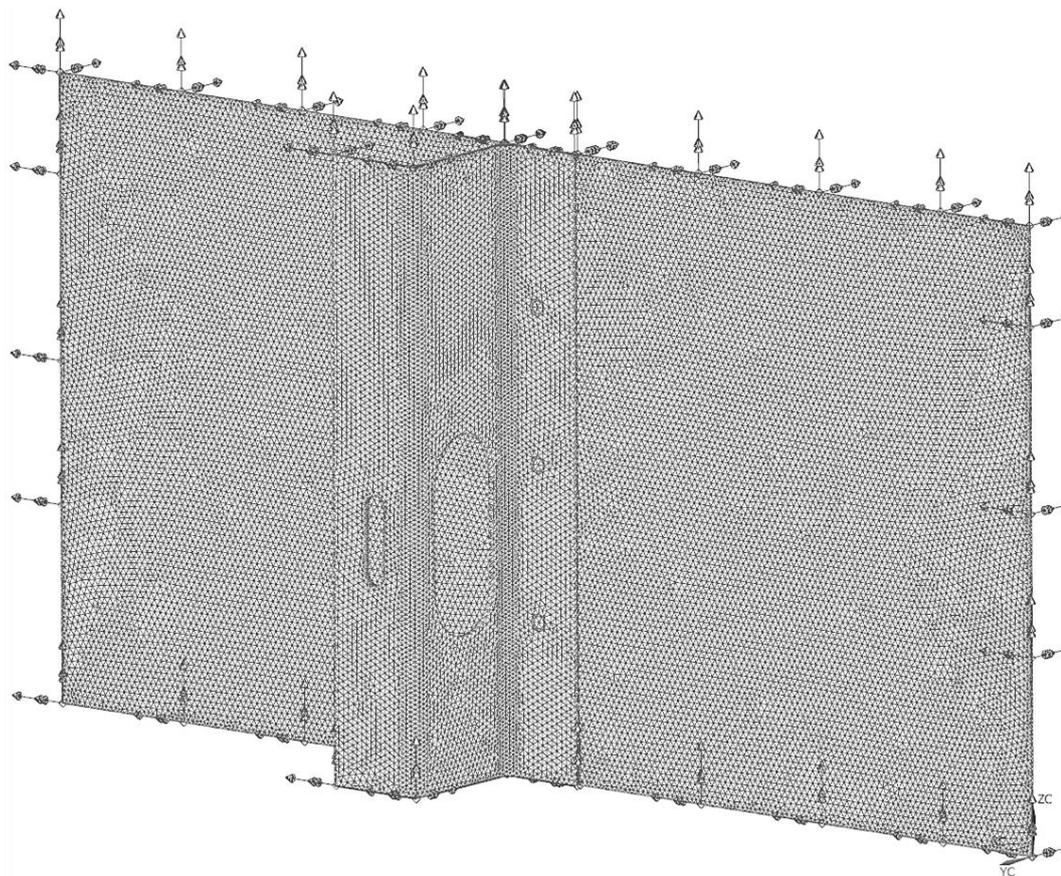
*а) вариант №1; б) вариант №2; в) вариант №3; г) вариант №4; д) вариант №5*  
**Рисунок 3.13 – Геометрические модели зоны обшивки боковой стены с перфорированными стойками для пяти вариантов перфорации**

Конечноэлементные модели выделенного фрагмента сформированы из четырехузловых тетраэдральных объемных элементов с характерным размером 3 мм. Характеристики разработанных конечноэлементных моделей представлены в таблице 3.8.

**Таблица 3.8 – Характеристики конечноэлементных моделей зоны обшивки боковой стены с перфорированными стойками пяти вариантов**

Вариант перфорации	Количество объемных элементов	Количество узлов	Общее число степеней свободы
1	158449	54190	325140
2	158865	54312	325872
3	159766	54590	327540
4	159553	54554	327324
5	159852	54637	327822

К граничным узлам выделенного фрагмента модели прикладываются статические нагрузки (перемещения и повороты), полученные из расчета пластинчатой конечноэлементной модели кузова вагона, обеспечивающие ее равновесие (рисунок 3.14). Нагружение пластинчатой конечноэлементной модели кузова вагона осуществлялось в соответствии с рекомендациями нормативной документации по I расчетному режиму.

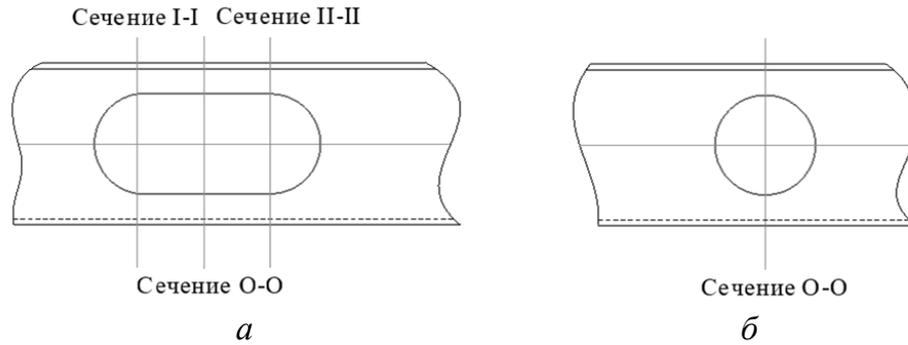


**Рисунок 3.14 – Схема нагружения фрагмента конечноэлементной модели зоны обшивки боковой стены с перфорированной стойкой**

В результате исследования выполнена оценка напряженно-деформированного состояния фрагмента конечноэлементной модели, выполненной объемными элементами, с учетом пяти вариантов перфорации подкрепляющих элементов и сопоставление результатов расчета с результатами, полученными при расчете пластинчатой конечноэлементной модели кузова вагона с данным вариантом перфорации.

В качестве исследуемых сечений приняты три поперечных сечения по отверстию перфорации стойки для вариантов перфорации №1, 2, 4, 5 и одно

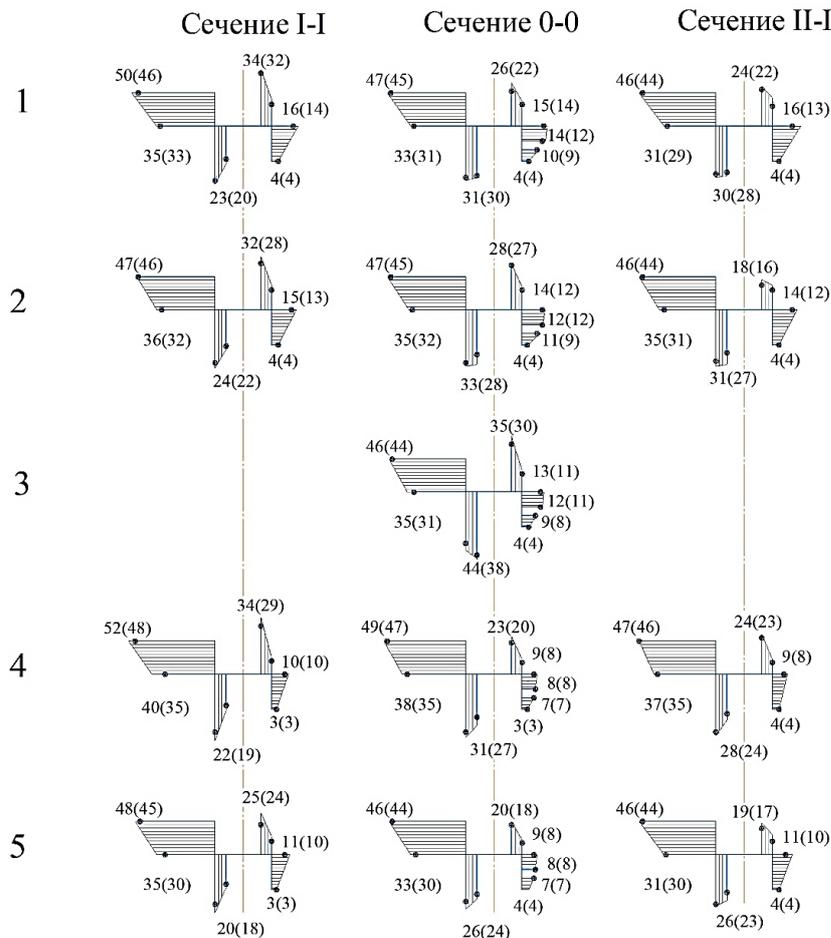
сечение для варианта №3. Схема расположения исследуемых сечений представлена на рисунке 3.15.



а) варианты перфорации – №1,2,4,5; б) вариант перфорации – №3

**Рисунок 3.15 – Схема исследуемых сечений по отверстию перфорации**

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния фрагмента конечноэлементной модели (обшивки боковой стены с перфорированными стойками) по исследуемым сечениям, а также сопоставление эквивалентных напряжений по двум расчетным моделям представлено на рисунке 3.16.



**Рисунок 3.16 – Эпюры эквивалентных напряжений фрагмента конечноэлементной модели в зависимости от варианта перфорации, МПа**

Значения напряжений, полученных при расчете пластинчатой конечноэлементной модели кузова, указаны цифрами в скобках.

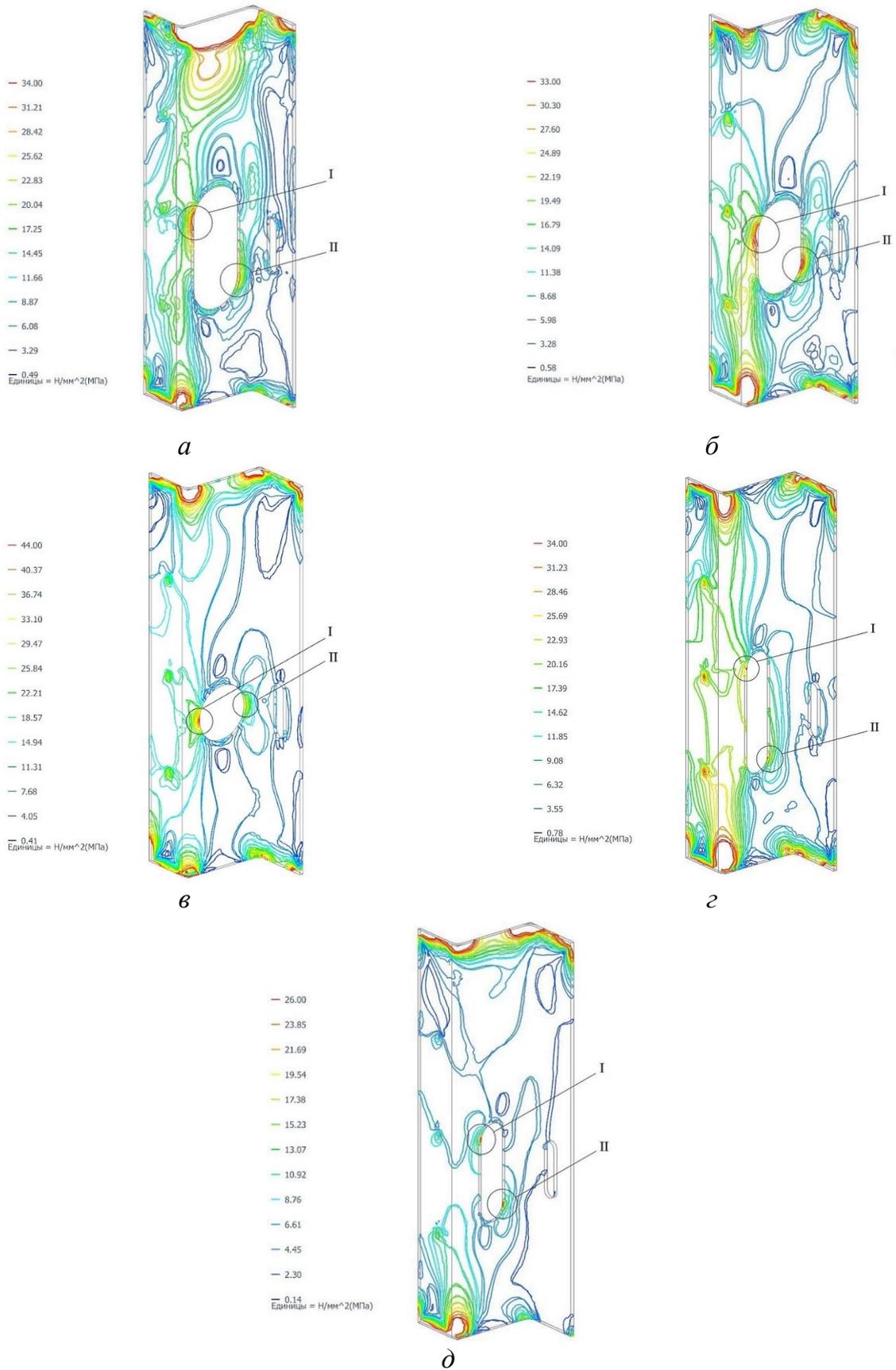
На основании анализа эквивалентных напряжений в соответствии с рисунком 3.16 можно сделать вывод, что максимальные напряжения в рассматриваемом фрагменте модели возникают в обшивке, в области соединения со стойкой. Наибольшие напряжения в зетовом профиле в зоне отверстия перфорации отмечены при использовании третьего варианта перфорации с круглым отверстием и составили 44МПа.

Картины напряженного состояния зетового профиля фрагмента модели от действия нормативной нагрузки для пяти вариантов перфорации представлены на рисунке 3.17 с указанием наиболее нагруженных зон I и II, которые размещены по диагонали отверстия перфорации.

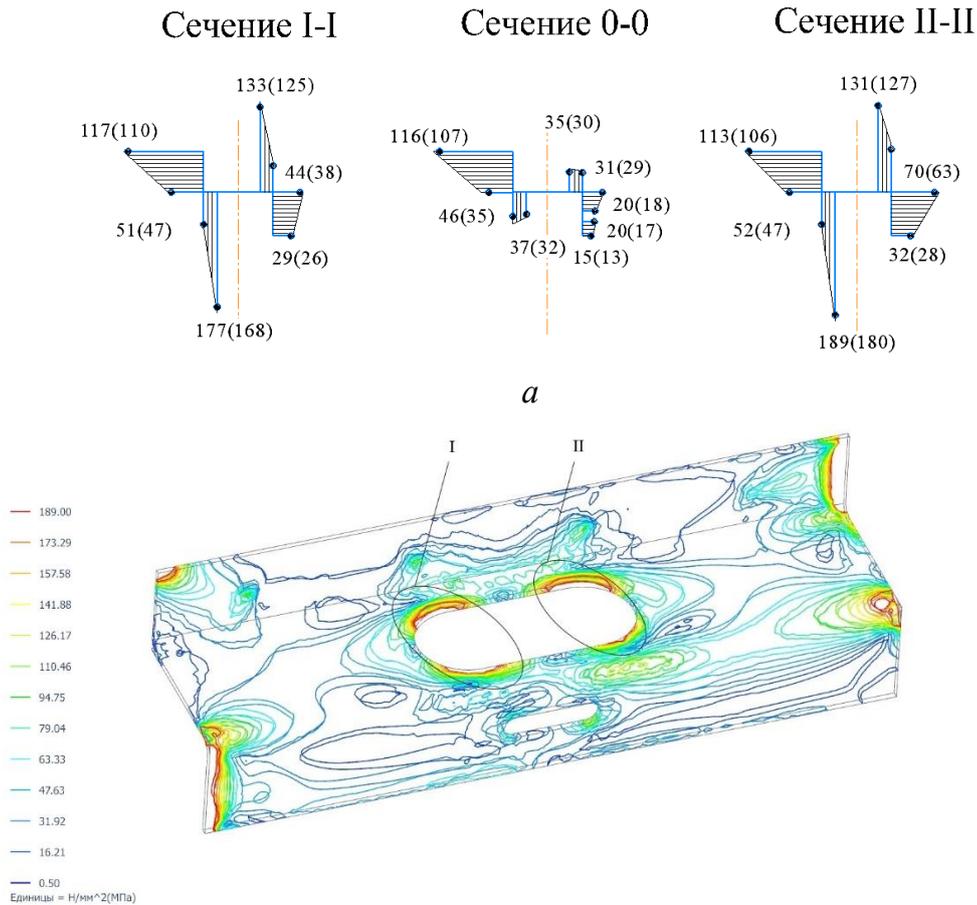
Аналогично, в соответствии с описанной выше методикой выделен фрагмент наиболее нагруженного стрингера с перфорацией и приваренной к нему обшивкой, взятый в сечении кузова ближайшем к срединному по подоконному поясу обшивки. Фрагмент выделен в модели с шестым вариантом перфорации, включает в себя центральное отверстие на участке стрингера между стойками.

Конечноэлементная модель выделенного фрагмента сформирована из 113 тыс. тетраэдральных объемных элементов, объединенных в 39 тыс. узлах. Общее число степеней свободы составило 233 тыс.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния фрагмента конечноэлементной модели (обшивки боковой стены с перфорированным стрингером) по исследуемым сечениям (рисунок 3.15, а), а также сопоставление эквивалентных напряжений по двум расчетным моделям представлено на рисунке 3.18, а. Значения напряжений, полученных при расчете пластинчатой конечноэлементной модели кузова, указаны цифрами в скобках. Картина напряженного состояния зетового профиля фрагмента модели от действия нормативной нагрузки с указанием наиболее нагруженных зон I, II представлена на рисунке 3.18, б.



а) вариант №1; б) вариант №2; в) вариант №3; г) вариант №4; д) вариант №5  
**Рисунок 3.17 – Картины напряженного состояния зетового профиля фрагмента модели от действия нормативной нагрузки для пяти вариантов перфорации с указанием наиболее нагруженных зон I, II**



*а* – эпюра эквивалентных напряжений, МПа; *б* – картина напряженного состояния зетового профиля с указанием наиболее нагруженных зон I, II

**Рисунок 3.18 – Напряженное состояние фрагмента конечноэлементной модели**

В соответствии с рисунком 3.18, б наиболее нагруженным участком стрингера является отверстие перфорации, при этом максимальные напряжения зоны отверстия перфорации наблюдаются в местах перехода прямого участка отверстия в цилиндрическое. Максимальные напряжения, полученные по объемной модели, составили 189 МПа.

Следует отметить, что расчетные значения эквивалентных напряжений по сечению перфорированного профиля, полученные на основе объемных конечноэлементных моделей фрагментов конструкции и в целом из пластинчатых моделей кузова вагона (рисунок 3.16, 3.18), количественно близки. Разница значений не превышает 15%. Из чего следует, что разработанные пластинчатые модели кузова вагона с перфорированными профилями позволяют получить адекватный результат при исследовании напряженно-деформированного состояния кузова вагона.

### 3.8 Выводы по разделу 3

1 Предложена конструкция кузова пассажирского вагона с негофрированной обшивкой боковых стен, подкрепленная стрингерами.

2 Разработана пластинчатая конечноэлементная модель предложенной конструкции, позволившая оценить ее прочность.

3 На основании прочностных расчетов конструкции определены подкрепляющие элементы, имеющие значительный запас прочности для применения в них перфорации с целью снижения металлоемкости кузова.

4 Предложено десять вариантов перфорации подкрепляющего набора, рекомендуемые для использования в конструкции, в соответствии с которыми разработаны десять пластинчатых и десять твердотельных компьютерных моделей кузова пассажирского вагона.

5 В методике для разработки пластинчатых конечноэлементных моделей кузова вагона в соответствии с вариантом перфорации в условиях производства применено суперэлементное редуцирование конструкции, позволяющее сократить время на их подготовку и анализ. В качестве суперэлемента принят участок балки с одним отверстием перфорации, позволяющим формировать перфорацию в подкрепляющем элементе конструкции комбинацией нескольких суперэлементов.

6 Верификация предлагаемых моделей с использованием суперэлементов выполнена сопоставлением результатов, полученных с помощью детализированной пластинчатой модели, сформированной традиционным путем, и модели с использованием суперэлементов. Расхождение значений напряжений для аналогичных узлов конечноэлементной сетки не превысило 1%, что подтверждает работоспособность предлагаемых моделей.

7 Выполнено экспериментальное исследование тестовых образцов в виде отрезков профилей с перфорацией и без подкрепляющего набора кузова, позволившее оценить их напряженное состояние. Графоаналитический метод расчета балки без перфорации, выполненный в соответствии с условиями

эксперимента, подтверждает достоверность результатов, полученных экспериментальным путем (разница значений экспериментального метода расчета с результатами аналитического метода расчета составила не более 10%).

8 С целью подтверждения адекватности используемых в работе методов оценки напряженно-деформированного состояния подкрепляющих элементов кузова, проведено сопоставление экспериментальных результатов расчетов и результатов, полученных с использованием МКЭ. Результаты расчета компьютерных моделей, полученных с использованием МКЭ, описывающие экспериментальное исследование, удовлетворительно соответствуют результатами эксперимента, их отличие не превышает 10%. Полученные результаты расчета подтверждают, что компьютерные расчетные модели кузова пассажирского вагона с перфорированными подкрепляющими элементами могут быть использованы для исследования их несущей способности.

9 Методом последовательного выделения областей выполнена уточненная оценка напряженного состояния подкрепляющих элементов в зонах отверстия перфорации. Определено, что для стоек максимальные напряжения располагаются по диагонали отверстия, для стрингеров – в местах перехода прямого участка отверстия в цилиндрическое.

## **4 ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ КОНСТРУКЦИИ КУЗОВА ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА С ПЕРФОРИРОВАННЫМИ ПОДКРЕПЛЯЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

### **4.1 Оценка влияния вариантов несущей конструкции кузова на их напряженно-деформированное состояние**

Одним из критериев, которому должна соответствовать несущая конструкция кузова пассажирского вагона, является обеспечение прочности при действии нормативных нагрузок.

Оценка напряженно-деформированного состояния несущих конструкций кузовов с десятью вариантами перфорации осуществлялась на основе разработанных детализированных пластинчатых конечноэлементных моделей с учетом тяжеловесного оборудования, сформированных в среде программного комплекса Siemens PLM Software NX.

Расчет конечноэлементных моделей выполнен в статической постановке для I, II, III расчетных режимов, а также от ремонтных нагрузок при подъемке за штатные места на двух домкратах по диагонали вагона. Наложение ограничивающих связей в пространстве и приложение продольных, поперечных и вертикальных нагрузок в моделях осуществлялось в соответствии с требованиями ГОСТ 34093 и ГОСТ 55182. Учет боковых сил при расчете кузова выполнен путем увеличения вертикальной нагрузки брутто.

Оценка напряженного состояния несущих конструкций выполнена по значениям максимальных нормальных напряжений. Максимальные напряжения в несущих элементах кузова пассажирского вагона в зависимости от варианта перфорации представлены в таблице 4.1.

Анализ приведенных в таблице 4.1 результатов позволяет сделать вывод, что максимальные напряжения наблюдаются в подкрепляющем наборе боковой стены кузова с вариантом перфорации №8 при I расчетном режиме сжатия составляют 94% от допустимого значения напряжений.

**Таблица 4.1 – Максимальные нормальные напряжения в несущих элементах кузова пассажирского вагона в зависимости от варианта перфорации, МПа**

Вариант перфорации	В обшивке боковой стены					В подкрепляющем наборе боковой стены					В настиле пола				
	I расчетный режим	II расчетный режим	III расчетный режим		Ремонтный расчетный режим	I расчетный режим	II расчетный режим	III расчетный режим		Ремонтный расчетный режим	I расчетный режим	II расчетный режим	III расчетный режим		Ремонтный расчетный режим
	Сжатие	Растяжение	Растяжение	Сжатие		Сжатие	Растяжение	Растяжение	Сжатие		Сжатие	Растяжение	Растяжение	Сжатие	
1	130	85	67	49	163	172	106	75	62	188	204	126	97	89	80
2	130	92	69	49	164	212	137	95	81	210	204	150	112	89	69
3	128	92	73	59	164	232	182	122	107	208	203	134	108	89	87
4	128	99	74	62	136	160	98	81	63	126	197	151	113	89	55
5	129	95	73	49	164	155	103	69	89	167	202	148	112	85	74
6	132	87	68	50	171	180	111	79	65	197	208	129	99	91	82
7	133	94	70	50	171	221	142	99	84	218	208	153	114	91	70
8	130	94	74	60	172	243	191	128	112	218	207	137	110	91	89
9	131	101	75	63	147	173	106	87	68	136	201	154	115	91	56
10	132	97	74	50	171	168	111	75	96	180	206	151	114	87	75

Продолжение таблицы 4.1

Вариант перфорации	В балках рамы					В обшивке крыши					В дугах крыши				
	I расчетный режим	II расчетный режим	III расчетный режим		Ремонтный расчетный режим	I расчетный режим	II расчетный режим	III расчетный режим		Ремонтный расчетный режим	I расчетный режим	II расчетный режим	III расчетный режим		Ремонтный расчетный режим
	Сжатие	Растяжение	Растяжение	Сжатие		Сжатие	Растяжение	Растяжение	Сжатие		Сжатие	Растяжение	Растяжение	Сжатие	
1	223	149	145	128	149	35	33	39	29	149	80	23	36	76	164
2	222	162	144	98	149	34	35	36	29	149	84	19	36	74	163
3	230	206	144	118	149	32	39	37	30	150	80	19	36	92	169
4	229	207	143	98	149	35	34	33	29	147	82	22	37	66	158
5	206	150	142	94	149	31	35	37	30	139	79	19	36	71	163
6	227	152	148	131	152	37	35	40	30	156	85	24	38	80	174
7	226	165	147	100	152	36	37	38	30	156	89	20	38	79	173
8	235	210	147	120	152	33	40	39	31	157	85	20	38	98	179
9	234	211	146	100	152	37	36	35	30	155	86	23	39	70	168
10	210	153	145	96	152	32	37	39	31	146	84	20	38	75	173

При этом максимальные напряжения в подкрепляющем наборе боковой стены для основных расчетных режимов отмечаются по кромке отверстий перфорации в стрингере подоконного пояса, ближайшем к уровню пола.

При расчете по ремонтному расчетному режиму в сравнении с максимальными напряжениями по основным расчетным режимам рост напряжений наблюдается в поперечном сечении кузова в зоне установки домкратов почти всех элементах конструкции, а также в узлах соединения стоек боковой стены с полом по всей длине кузова, при этом напряжения в стрингерах боковой стены незначительны. Значения напряжений по ремонтному расчетному режиму как правило, превышают максимальные значения напряжений при расчете по основным режимам, исключения составляют расчеты для балок рамы и настила пола.

Максимальные напряжения в раме наблюдаются в хребтовой, шкворневой и поперечных балках, к которым крепится подвагонное оборудование. При этом разница между значениями максимальных напряжений среди вариантов кузовов не превышает 14%.

Существенное влияние перфорации отражается на значениях напряжений в подкрепляющем наборе боковой стены кузова, в дугах крыши и настиле пола, где разница значений напряжений между вариантами перфорации превышает 30%.

Максимальные расчетные напряжения в целом по конструкции кузовов вагонов для всех рассматриваемых вариантов перфорации не превышают допусковых. При этом меньший запас прочности в стрингерах кузова обеспечивается при использовании №3, 7, 8 вариантов перфорации.

#### **4.2 Оценка влияния вариантов несущей конструкции кузова на снижение величины их массы**

Определение величины снижения массы металлоконструкций кузова вагона за счет различных вариантов перфорации подкрепляющих элементов выполнено на основе ранее разработанных десяти твердотельных детализированных пространственных компьютерных моделей. Разница масс оценивалась относительно

массы исходной металлоконструкции кузова вагона. Результаты расчета сведены в таблицу 4.2.

**Таблица 4.2 – Снижение массы металлоконструкции в зависимости от варианта перфорации, кг**

Вариант перфорации	Снижение массы металлоконструкции
1	190,6
2	147,7
3	85,9
4	110,1
5	88,6
6	284,5
7	220,4
8	128,2
9	164,3
10	132,2

На основании таблицы 4.2 максимальная величина снижения массы металлоконструкции достигнута при использовании варианта перфорации №6.

#### **4.3 Оценка влияния вариантов несущей конструкции кузова на устойчивость сжатых элементов подкрепляющего набора и элементов обшивки**

В соответствии с ГОСТ 34093 несущая конструкция кузова вагона должна обеспечивать достаточный запас устойчивости элементов его конструкции, работающих на сжатие.

Оценка устойчивости сжатых элементов подкрепляющего набора и элементов обшивки кузовов пассажирских вагонов при действии нормативных нагрузок осуществлена на основе пластинчатых конечноэлементных моделей по критериям локальной и глобальной потери устойчивости [166]. Анализ устойчивости конструкций проведен в нелинейной постановке, учитывающей геометрическую нелинейность и нелинейные упругопластические свойства стали, с использованием встроенного модуля решателя NX Nastran. Учет критерия устойчивости выполнен при анализе как качественный.

Оценка устойчивости сжатых элементов выполнена по значению расчетного коэффициента запаса устойчивости путем сравнения с допускаемым.

Значения расчетных коэффициентов запаса устойчивости кузовов пассажирских вагонов представлены в таблице 4.3.

**Таблица 4.3 – Коэффициенты запаса устойчивости кузовов вагонов в зависимости от варианта перфорации**

Вариант перфорации	Коэффициент запаса устойчивости
1	1,41
2	1,42
3	1,45
4	1,44
5	1,45
6	1,37
7	1,39
8	1,43
9	1,42
10	1,43

В соответствии с данными таблицы 4.3 минимальное расчетное значение коэффициента запаса устойчивости для элементов подкрепляющего набора кузова среди всех рассматриваемых вариантов перфорации составило 1,37 при допуске значения 1,1, что свидетельствует об обеспечении устойчивости сжатых несущих элементов кузова при действии на него нормативных нагрузок.

#### **4.4 Оценка влияния вариантов несущей конструкции кузова на значение собственных частот изгибных колебаний**

Жесткость несущих конструкций кузовов вагонов с массой брутто оценена по первой частоте собственных изгибных колебаний кузова, регламентированной ГОСТ 34093, которая не должна быть ниже 8 Гц.

Результаты расчета первой частоты собственных изгибных колебаний кузовов рассматриваемых конструкций представлены в таблице 4.4.

В соответствии с таблицей 4.4 значения частот первого тона изгибных колебаний рассматриваемых конструкций кузовов вагонов выше нормативного значения. Наибольшее значение первой частоты собственных изгибных колебаний имеет конструкция с вариантом перфорации №6.

**Таблица 4.4 – Значения первой собственной частоты колебаний кузовов вагонов в зависимости от варианта перфорации, Гц**

Вариант перфорации	Первая частота собственных изгибных колебаний
1	8,128
2	8,127
3	8,126
4	8,126
5	8,126
6	8,129
7	8,128
8	8,127
9	8,127
10	8,127

Следует отметить, что разница значений частот собственных колебаний кузова вагона для рассматриваемых вариантов не превышает 1%.

#### **4.5 Оценка влияния вариантов несущей конструкции кузова на их усталостную долговечность**

Усталостная долговечность несущей конструкции кузова пассажирского вагона с перфорированными профилями определяется усталостной долговечностью наиболее нагруженных зон подкрепляющего набора. Зоны отверстий перфорации являются концентраторами напряжений и способствуют возникновению в них усталостных повреждений конструкции. В качестве источников усталостных повреждений выступают динамические напряжения, возникающие в зонах отверстий перфорации вследствие воздействия совокупности эксплуатационных нагрузок.

Анализ усталостной долговечности конструкций кузовов пассажирских вагонов с перфорированными подкрепляющими элементами в работе выполнялся в соответствии с методиками С.В. Серенсена – В.П. Когаева и В.В. Болотина, по формулам 2.30 и 2.31 соответственно.

Анализ прочности несущих конструкций кузовов вагонов в динамической постановке с десятью вариантами перфорации подкрепляющих элементов проводился в несколько этапов. На первом этапе с использованием методов

твердотельного компьютерного моделирования в среде программного комплекса «Универсальный механизм» рассчитаны динамические силы, действующие на несущую конструкцию кузова вагона в процессе движения вагона по реальным неровностям рельсового пути.

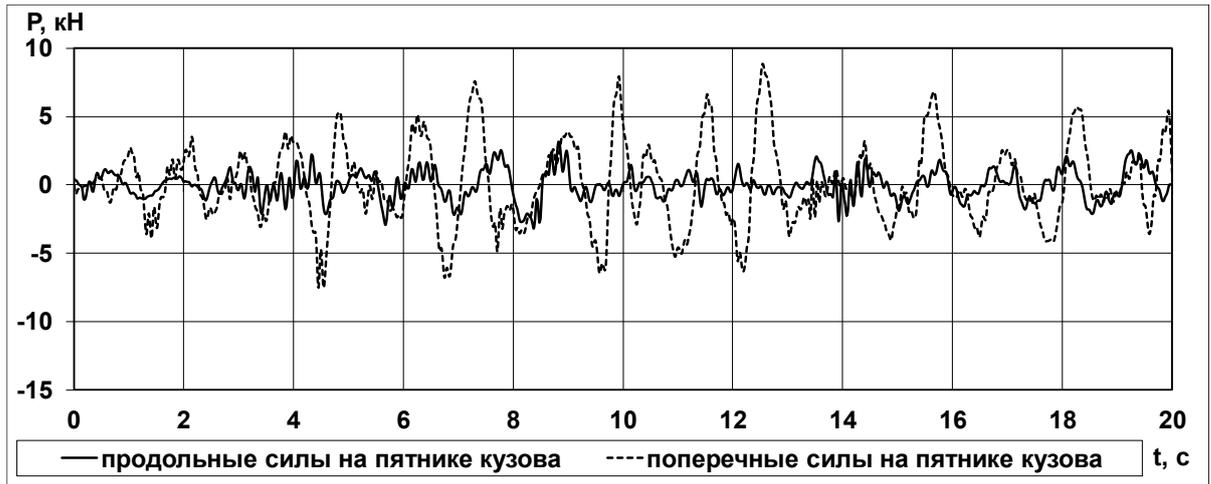
Исследование динамического нагружения несущих конструкций кузовов вагонов проводится на прямых участках пути, в кривых, а также по стрелочным переводам с крестовиной марки 1/11, соответствующих участку маршрута Москва – Санкт-Петербург, для диапазона скоростей 20–160 км/ч с интервалом 20 км/ч. Моделирование движения вагона исследуется с учетом микронеровностей пути, формирование которых осуществляется в соответствии с РД 32.68-96 [167]. Прохождение кривых участков пути моделируется с учетом минимально допустимого значения радиуса кривой для рассматриваемой скорости движения согласно [168]. Зависимость скорости движения вагона от радиуса кривой представлена в таблице 4.5.

**Таблица 4.5 – Скорость прохождения кривой в зависимости от ее радиуса**

Параметр	Радиус кривой, м			
	300	500	700	1200
Скорость прохождения кривой, км/ч	80	100	120	160

В результате моделирования динамики движения пассажирского вагона с перфорированными профилями получены динамические усилия, действующие на несущую конструкцию кузова вагона в шкворневом узле и в зонах скользунов. В качестве примера на рисунках 4.1, 4.2 представлены графики динамических усилий, действующих на конструкцию при движении вагона в кривой и по прямому участку пути со скоростью 80 км/ч.

На втором этапе исследования диапазоны динамических усилий в виде осциллограмм изменения усилий во времени для рассматриваемых режимов эксплуатации прикладывались к детализированным конечноэлементным моделям несущей конструкции. Оценка напряженно-деформированного состояния конструкции выполняется методом непосредственного интегрирования уравнений узловых перемещений, реализованном в программном комплексе Siemens PLM Software Femap.



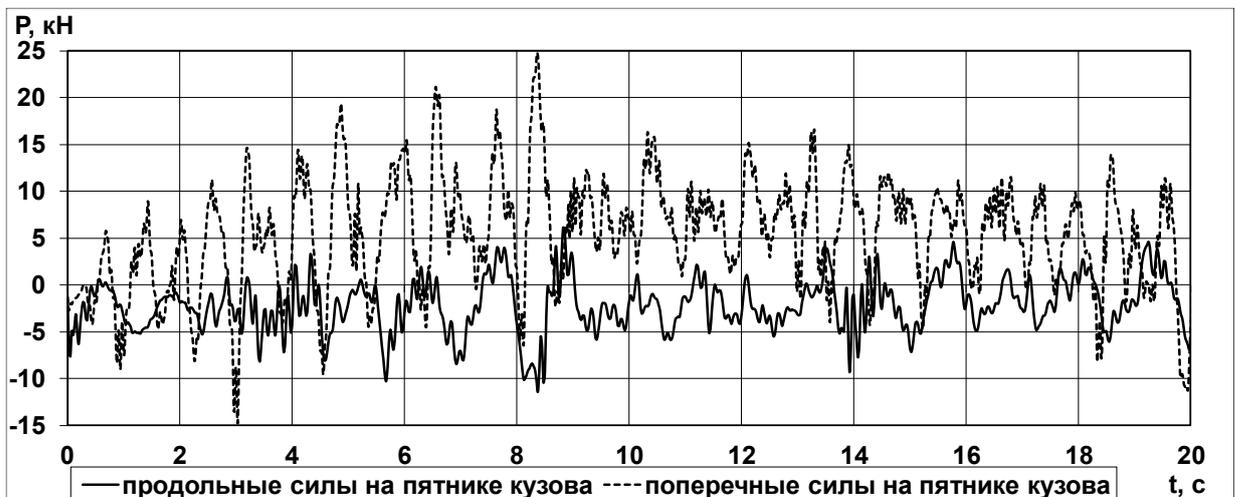
а



б

а) в вертикальном направлении  $Z$  в зоне пятника; б) в вертикальном направлении  $Z$  в зоне скользунов кузова

**Рисунок 4.1 – Динамические усилия, действующие на раму кузова при движении вагона по прямому участку пути со скоростью 80 км/ч**



а



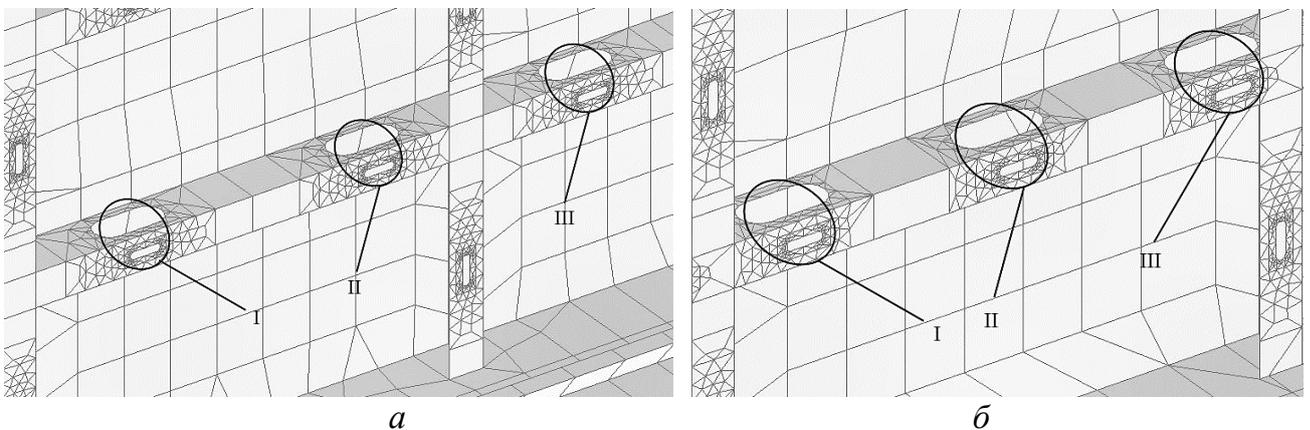
б

а) в вертикальном направлении  $Z$  в зоне пятника; б) в вертикальном направлении  $Z$  в зоне скользянов кузова

**Рисунок 4.2 – Динамические усилия, действующие на раму кузова при движении вагона в кривой радиусом 1000 м со скоростью 80 км/ч**

Учет внутреннего трения в конструкции осуществляется по гипотезе Фойгта [169]. Коэффициент конструкционного демпфирования при расчетах принимается равным 10% от критического.

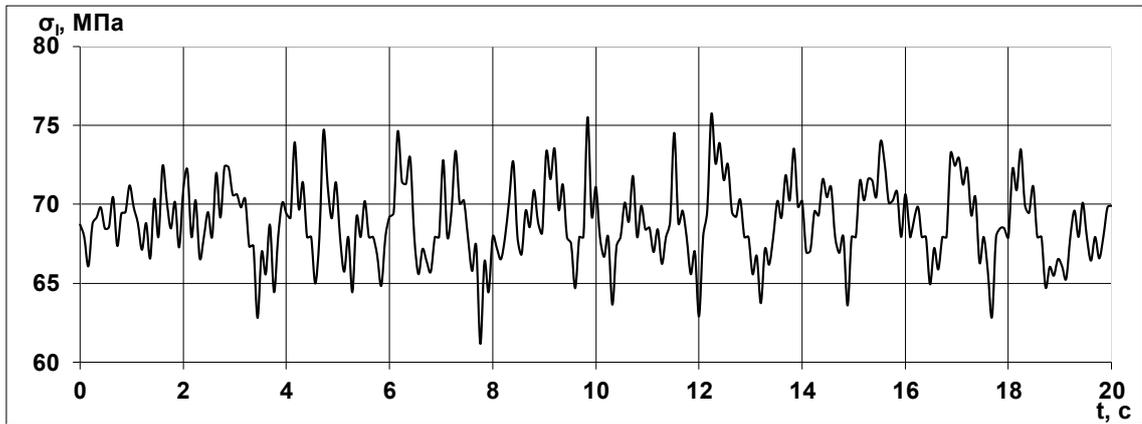
На основании картины напряженно-деформированного состояния десяти вариантов несущих конструкций кузовов вагонов определены наиболее нагруженные зоны подкрепляющего набора кузова. Они располагаются в нижнем стрингере подоконного пояса обшивки, ближайшем к уровню пола, в области отверстий перфорации, в срединном сечении кузова. В качестве примера на рисунке 4.3 представлены наиболее нагруженные зоны I, II, III стрингера для вариантов перфорации №1 и №6.



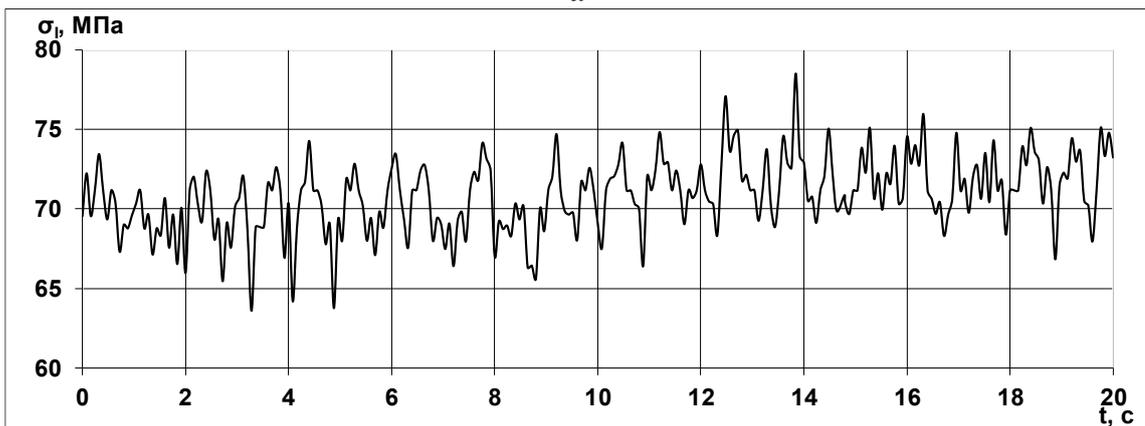
а) вариант перфорации №1; б) вариант перфорации №6

**Рисунок 4.3 – Наиболее нагруженные зоны I, II, III стрингера в пластинчатой конечноэлементной модели кузова**

В результате расчета конечноэлементной модели от динамических нагрузок формируются графики изменения напряжений в наиболее нагруженных зонах конструкции. В качестве примера осциллограммы изменения напряжений в наиболее нагруженных зонах во времени при движении вагона со скоростью 80 км/ч представлены на рисунках 4.4–4.6.



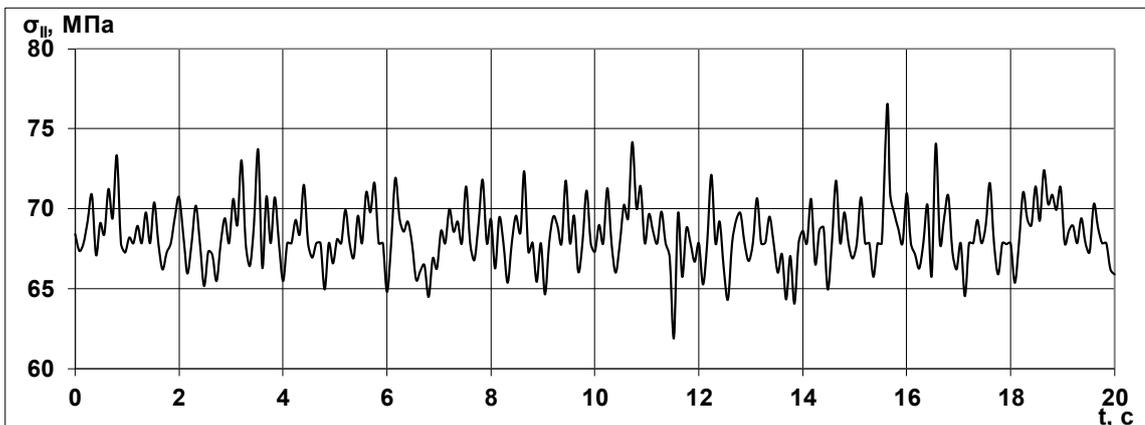
а



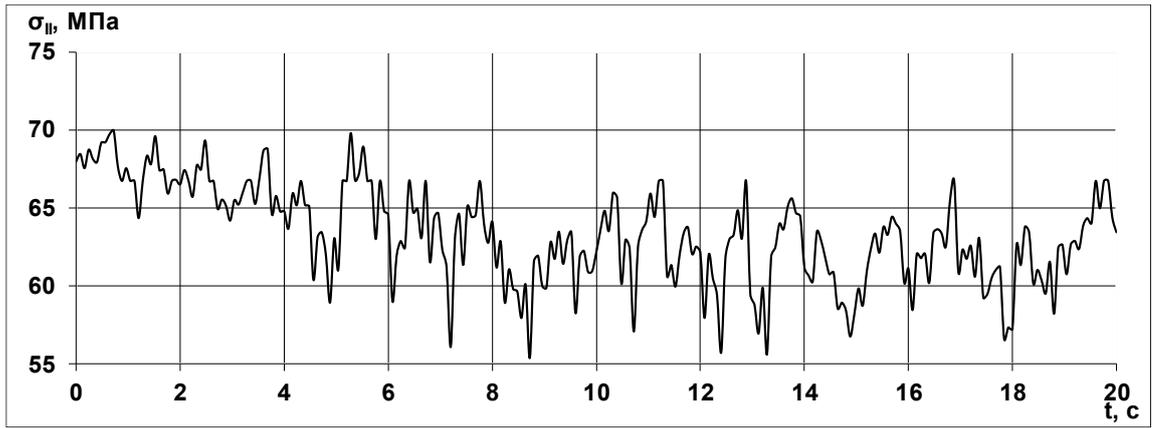
б

*а) на прямом участке пути; б) на криволинейном участке пути*

**Рисунок 4.4 – Осциллограмма изменения напряжений во времени в зоне I стрингера с шестым вариантом перфорации при движении вагона со скоростью 80 км/ч**



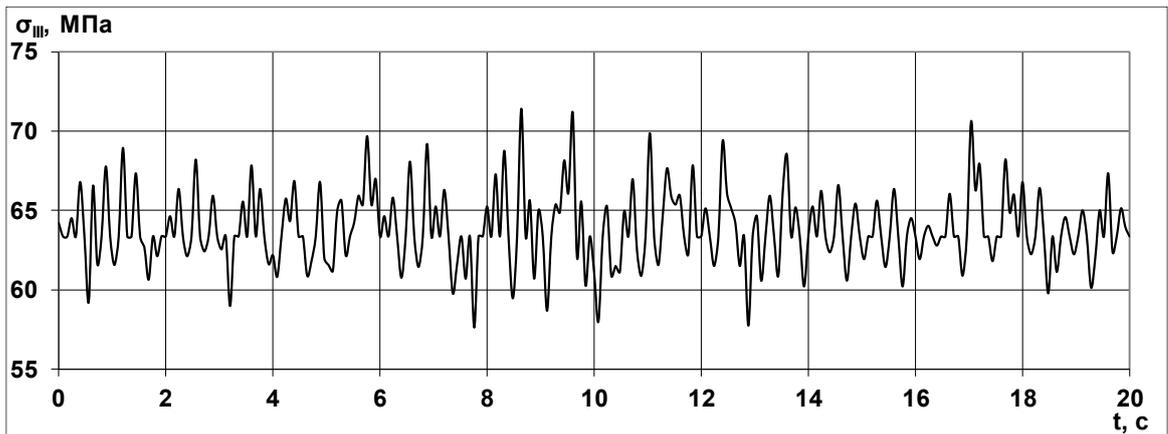
а



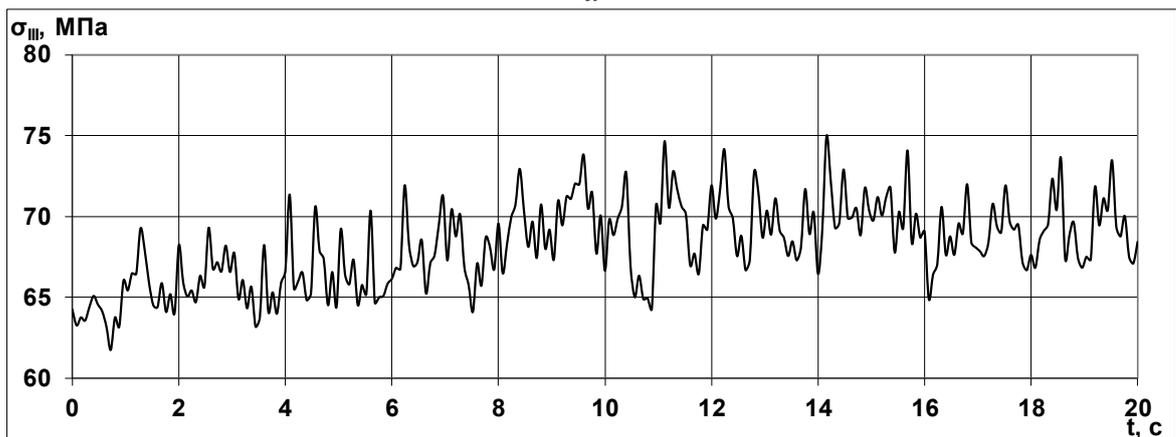
б

*а) на прямом участке пути; б) на криволинейном участке пути*

**Рисунок 4.5 – Осциллограмма изменения напряжений во времени в зоне II стрингера с шестым вариантом перфорации при движении вагона со скоростью 80 км/ч**



а



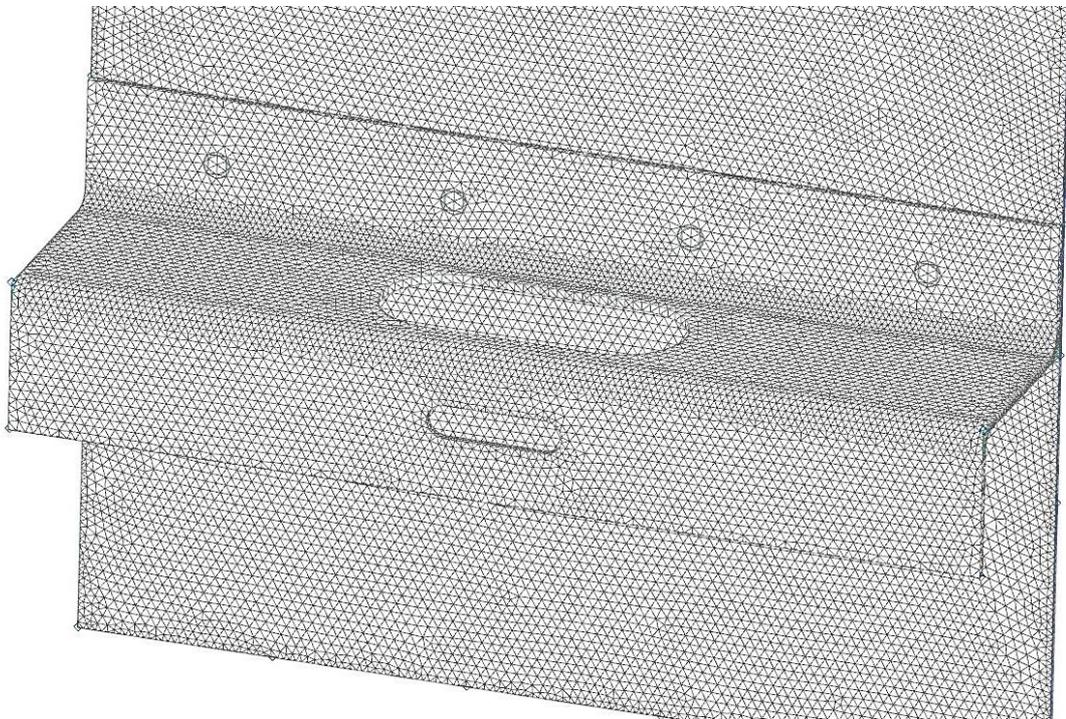
б

*а) на прямом участке пути; б) на криволинейном участке пути*

**Рисунок 4.6 – Осциллограмма изменения напряжений во времени в зоне III стрингера с шестым вариантом перфорации при движении вагона со скоростью 80 км/ч**

На третьем этапе исследования выполнена уточненная оценка динамического напряженного состояния наиболее нагруженных зон перфорированного профиля путем их вычленения из конечноэлементных моделей кузовов методом последовательного выделения областей с разработкой упруго-диссипативных динамических конечноэлементных моделей.

Конечноэлементные модели формировались из четырехузловых тетраэдральных объемных элементов с характерным размером 3 мм (рисунок 4.7). Количество объемных элементов выделенных зон составило порядка 158 тыс., объединенных в 54 тыс. узлах, общее число степеней свободы – 325 тыс.



**Рисунок 4.7 – Уточненная объемная конечноэлементная модель наиболее нагруженной зоны II перфорированного стрингера**

Нагружение конечноэлементных расчетных схем выполнялось приложением к граничным узлам модели динамических нагрузок в виде осциллограмм изменения усилий во времени, полученных при расчете конечноэлементной модели кузова вагона в процессе движения.

Результаты расчета для рассматриваемых вариантов конструкций по трем наиболее нагруженным зонам перфорированных подкрепляющих элементов для

конечноэлементных моделей кузовов и их уточненных участков приведены в таблице 4.6.

**Таблица 4.6 – Соответствие срока службы несущей конструкции кузовов пассажирского вагона в годах варианту перфорации подкрепляющих элементов кузова**

Вариант перфорации	Зона I				Зона II				Зона III			
	КЭ модель кузова		КЭ модель участка кузова		КЭ модель кузова		КЭ модель участка кузова		КЭ модель кузова		КЭ модель участка кузова	
	Зависимость 1*	Зависимость 2**	Зависимость 1	Зависимость 2	Зависимость 1	Зависимость 2	Зависимость 1	Зависимость 2	Зависимость 1	Зависимость 2	Зависимость 1	Зависимость 2
1	44,5	32,4	43,1	33,8	43,1	31,4	41,7	32,7	44,6	32,5	43,2	33,9
2	41,1	30,1	39,4	31,2	35,0	25,5	33,9	26,6	36,2	26,4	35,0	27,5
3	32,9	24,0	31,9	25,0	32,0	23,3	30,9	24,3	33,1	24,1	32,0	25,1
4	47,7	34,8	46,2	36,3	46,4	33,8	44,8	35,2	47,9	34,9	46,4	36,4
5	49,4	36,0	47,8	37,5	47,9	34,9	46,4	36,4	49,5	36,1	47,9	37,6
6	42,4	30,9	41,0	32,2	41,2	30,0	39,9	31,3	42,5	31,0	41,2	32,3
7	39,5	28,8	38,2	30,0	27,9	24,5	32,5	25,5	34,7	25,3	33,6	26,4
8	31,6	23,0	30,4	23,9	30,6	22,3	29,6	23,2	31,7	23,1	30,7	24,1
9	44,2	32,2	42,8	33,6	42,8	31,2	41,4	32,5	44,3	32,3	42,9	33,7
10	45,6	33,2	44,1	34,6	44,2	32,2	42,8	33,6	45,7	33,3	44,2	34,7

\* Методика С.В. Серенсена – В.П. Когаева.

\*\* Методика В.В. Болотина.

В соответствии с результатами, приведенными в таблице 4.6, наименьшие сроки службы наблюдаются в зоне II перфорированного стрингера. Сроки службы кузовов вагонов с вариантами перфорации подкрепляющих элементов №2, 3, 7 и 8 не превышают минимальный назначенный срок службы вагона-аналога с кузовом из углеродистых сталей, равный 28 годам.

Значения уточненного расчета с использованием модели выделенного участка превышают значения расчета модели кузова в целом не более чем на 4%, что также не превышает назначенный срок службы вагона-аналога. Применение кузовов вагонов с вариантами перфорации №2, 3, 7 и 8 с точки зрения усталостной долговечности является не целесообразным.

Сроки службы исследуемых конструкций вагонов с вариантами перфорации №1, 4, 5, 6, 9, 10 превышают сроки службы вагона-аналога, что свидетельствует о работоспособности данных конструкций.

Следует отметить, что результаты, полученные по методике В.В. Болотина идут в запас, что является предпочтительным для теоретических расчетов прогнозирования усталостной долговечности ответственных конструкций. В соответствии с этим максимальный срок службы, рассчитанный по методике В.В. Болотина в наиболее нагруженной зоне, имеет вагон с вариантом перфорации №5, который превышает срок службы вагона-аналога на 24,6% при расчете кузова в целом и на 30% при уточненном расчете участка кузова.

#### **4.6 Выводы по разделу 4**

1 Выполнена оценка напряженно-деформированного состояния несущих конструкций кузова пассажирского вагона с различными вариантами перфорации подкрепляющих элементов в статической постановке. Максимальные расчетные напряжения в целом по конструкции кузовов вагонов для всех рассматриваемых вариантов не превышают допустимых, при этом у варианта № 8 напряжения близки к критическим.

2 Выполнена оценка влияния вариантов несущей конструкции кузова на снижение величины их массы. Максимальная величина снижения массы металлоконструкции достигнута при использовании варианта №6 перфорации и составляет порядка 284 кг. Минимальное снижение металлоемкости 85,9 кг достигнуто при использовании варианта перфорации №3.

3 Исследовано влияние вариантов несущей конструкции кузова на устойчивость сжатых элементов подкрепляющего набора и элементов обшивки. Коэффициенты запаса устойчивости исследуемых конструкций имеют значения выше нормативных. Минимальное расчетное значение коэффициента запаса устойчивости для элементов подкрепляющего набора кузова среди всех

рассматриваемых вариантов перфорации составило 1,37 для варианта №6 перфорации, превышающее нормативное значение на 24%.

4 Исследовано влияние вариантов несущей конструкции кузова на значение собственных частот изгибных колебаний. Частоты первого тона изгибных колебаний исследуемых конструкций имеют значения выше нормативных. Наибольшее значение первой частоты собственных изгибных колебаний имеет конструкция с вариантом перфорации №6, при этом разница значений частот собственных колебаний кузова вагона для рассматриваемых вариантов не превышает 1%.

5 Выполнен анализ прочности несущих конструкций кузовов вагонов в динамической постановке, а также уточненный расчет выделенных участков кузова. Отмечено, что сроки службы наиболее нагруженных зон подкрепляющего набора с вариантами перфорации №1, 4, 5, 6, 9, 10 превышают сроки службы до первого капитального ремонта вагона-аналога. Причем максимальный срок службы кузова вагона, рассчитанный по методике В.В. Болотина в наиболее нагруженной зоне, имеет вагон с вариантом перфорации №5, который превышает срок службы вагона-аналога на 24,6% при расчете кузова в целом и на 30% при уточненном расчете участка кузова.

6 В качестве рациональной несущей конструкции кузова пассажирского вагона с негофрированной обшивкой боковых стен, подкрепленной перфорированными подкрепляющими элементами принят вариант перфорации №6 с параметрами: диаметр отверстия – 40 мм, расстояние между центрами отверстий – 50 мм, шаг перфорации – 220 мм, обеспечивающий максимальное снижение металлоемкости и удовлетворяющий установленным критериям.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 На основе анализа мирового опыта проектирования кузовов пассажирских вагонов предложен вариант конструкции кузова пассажирского вагона с обшивкой, подкрепленной стрингерами. Для снижения тары вагона в несущей конструкции кузова применены перфорированные подкрепляющие элементы. Предложено десять вариантов перфорации.

2 Разработана и апробирована методика обоснования выбора типа и параметров перфорации элементов подкрепляющего набора кузова пассажирского вагона на примере кузова отечественного пассажирского вагона, позволившая выбрать рациональный вариант конструкции в зависимости от варианта перфорации в соответствии с установленными критериями.

3 Для этого были разработаны и верифицированы проблемно-ориентированные твердотельные и пластинчатые расчетные модели исследуемой несущей конструкции кузова пассажирского вагона с перфорированными подкрепляющими элементами, позволившие выполнить их анализ.

4 На основании сформированных в соответствии с вариантом перфорации компьютерных моделей несущей конструкции кузова пассажирского вагона выполнена оценка их металлоемкости, прочности, жесткости несущей конструкции и устойчивости сжатых элементов кузова.

5 Проведена оценка динамической нагруженности кузовов пассажирских вагонов с перфорированными подкрепляющими элементами на основе гибридной верифицированной модели вагона. Данная оценка показала, что наиболее нагруженными несущими элементами подкрепляющего набора кузова, определяющими прочность кузова в целом по основным расчетным режимам, являются перфорированные стрингеры.

6 Выполнена оценка усталостной долговечности кузовов пассажирских вагонов с перфорированными подкрепляющими элементами. Установлено, что несущие конструкции кузова пассажирского вагона с вариантами перфорации

подкрепляющих элементов №1, 4, 5, 6, 9, 10 удовлетворяют требованиям усталостной долговечности конструкции.

7 Выполнена оценка эффективности рекомендуемых технических решений кузовов пассажирских вагонов с перфорированными подкрепляющими элементами на основе комплекса расчетов и численных экспериментов.

8 Рекомендована оригинальная несущая конструкция кузова пассажирского вагона с негофрированной обшивкой боковых стен, подкрепленная перфорированными профилями, обеспечивающая прочность, жесткость, устойчивость сжатых элементов конструкции и усталостную долговечность кузова.

Установлено, что для пассажирских вагонов рассматриваемой конструкции рациональными параметрами перфорации подкрепляющих элементов являются: диаметр отверстия – 40 мм, расстояние между центрами отверстий – 50 мм, шаг перфорации – 220 мм. Использование принятой стрингерной конструкции кузова пассажирского вагона с перфорированными подкрепляющими элементами позволяет обеспечить максимальное снижение металлоемкости конструкции среди рассматриваемых вариантов.

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, могут быть использованы при проектировании несущих конструкций новых пассажирских вагонов.

Перспективой дальнейшей разработки темы является развитие методики обоснования выбора типа и параметров перфорации элементов подкрепляющего набора кузова пассажирского вагона с учетом применения алюминиевых сплавов, влияния повышенных скоростей движения, а также оценка влияния перфорации на теплопроводность кузова.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1 Транспорт в апреле 2019 года [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики. – Режим доступа: [http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/transport/](http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/transport/) (дата обращения 03.06.2019).

2 Юхневский, А.А. Оценка прочности кузова пассажирского вагона / А.А. Юхневский, В.В. Кобищанов // тез. докл. 53-й науч. конф. проф. препод, состава БГТУ. Брянск, 1996. – ч.1. – С. 38.

3 Ломаков, П.С. Определение оптимальных параметров несущих элементов кузова пассажирского вагона блочной конструкции с учетом предварительного напряжения его узлов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Ломаков Петр Сергеевич. – Брянск, 1990. – 178 с.

4 Коршунов, С.Д. Методика расчетно-экспериментальных исследований кузовов современного подвижного состава / С.Д. Коршунов, А.Н. Скачков, С.Л. Самошкин, Д.И. Гончаров, А.С. Жуков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 4 (45) – С. 38-47.

5 Коршунов, С.Д. Комплексные испытания вагона R1C модели 61-4476 / С.Д. Коршунов, А.Н. Скачков, С.Л. Самошкин, А.А. Юхневский // Железные дороги мира. – 2014. – №7 – С. 30-35.

6 Ходовые прочностные испытания вагона модели 61-4447: отчет о НИР. – Тверь: ЗАО НО «ТИВ», 2014. – 84 с.

7 Прочностные статические испытания кузова пассажирского вагона модели 61-4447: отчет о НИР. – Тверь: ЗАО НО «ТИВ», 2012. – 35 с.

8 Гончаров, Д.И. Проведение исследований по оценке несущей способности кузова головного вагона электропоезда Эг2Тв / Д.И. Гончаров, П.С. Ломаков, А.А. Юхневский, А.А. Смирнов // в сб.: «Проблемы и перспективы развития вагоностроения», Материалы V Всероссийской научно- практической конференции. – Брянск: БГТУ, 2014. – С. 57-60.

9 Афанасьев, Е.В. Оценка устойчивости элементов обшивки кузовов пассажирских вагонов с учетом начальной погиби: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07/ Афанасьев Евгений Владимирович. – М., 1988. – 127 с.

10 Мейстер, В.М. Расчет свободных изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов / В.М. Мейстер. – М.: Тр. ВНИИВ., 1967, вып.6. – С. 16-21.

11 Кобищанов, В.В. Выбор параметров конструкций кузовов вагонов с тонкой несущей обшивкой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Кобищанов Владимир Владимирович. – М.: МИИТ, 1999. – 57 с.

12 Кобищанов, В.В. Выбор рациональной конструкции двухслойной обшивки боковых стен пассажирских вагонов / В.В. Кобищанов, Д.Я. Антипин, Д.Ю. Расин, А.М. Высоцкий // Вестник брянского государственного технического университета. – 2014. – №4.

13 Антипин, Д.Я. Нагруженность пассажирского поезда при аварийномсоударении с автомобилем на железной дороге / Д.Я. Антипин, С.Г. Шорохов, О.И. Бондаренко // Известия Транссиба. – 2018. – № 3 (35). – С. 2-10.

14 Орлова, А.М. Межгосударственный стандарт "Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытания на прочность и динамические качества" / А.М. Орлова, С.Г. Васильев// Вагоны и вагонное хозяйство. – 2014. - № 1(37). – С. 29-32.

15 Черкашин, Ю.М. Перспективные направления совершенствования системы демпфирования колебаний пассажирских вагонов / Ю.М. Черкашин, А.Н. Скачков, А.В. Зайцев // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2009. – № 5. – С. 3-6.

16 Ромен, Ю.С. Математическое моделирование при исследовании взаимодействия экипажа и пути / Ю.С. Ромен // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 11. – С. 62-64.

17 Сысоев, А.В. Усовершенствована система технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов / А.В. Сысоев, А.М. Краснобаев, Г.В. Райков, С.В. Федяинова // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. – № 1. – С. 35-38.

18 Пигунов, А. В. Комплексная оценка технического состояния и остаточной несущей способности кузовов пассажирских вагонов: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / Пигунов Анатолий Владимирович. – Гомель. БелГУТ, 2002. – 17 с.

19 Бачурин, Н.С. Нагруженность несущих элементов кузова трамвайного вагона / Н.С. Бачурин, Н.Л. Иванов, К.М. Колясов // Безопасность движения, совершенствование конструкций вагонов и ресурсосберегающих технологий в вагонном хозяйстве. – Екатеринбург: УрГУПС. – 2007.

20 Приходько, В.И. Расчет динамических показателей пассажирского вагона / В.И. Приходько // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2006. – С. 146-152.

21 Приходько, В.И. Тележка для скоростных пассажирских вагонов украинских железных дорог / В.И. Приходько, Б.А. Коробка, А.А. Радзиховский, О.А. Шкабров // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2004. – С. 172-174.

22 Baykasoglu, C. Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models [Электронный ресурс] / C. Baykasoglu, E.Sunbuloglu, S. Bozdog, F. Aruk, T. Toprak, A. Mugan // Istanbul, Turkey. – Режим доступа: <http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/yayinlar/cengizbaykasoglu@hititedutr110920130Y7K9T0V.pdf> (дата обращения: 28.03.2018).

23 Toprak, T. Railroad Passenger Vehicle Collision Analysis / T. Toprak. - Istanbul, Turkey. - Режим доступа: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/rr.pdf> (дата обращения: 24.04.2018).

24 Kirkpatrick, S W. Evaluation of passenger rail vehicle crashworthiness/ S. W. Kirkpatrick, M. Schroeder, J. W. Simons // International Journal of Crashworthiness. – 2001. - № 6 (1). – p. 95-106.

25 Bingrong, Miao. Evaluation of Railway Vehicle Car Body Fatigue Life and Durability using Multidisciplinary Analysis Method [Электронный ресурс] / Miao Bingrong, Zhangb Weihua, Zhangb Jihui, Jinb Dingchang // China. – Режим доступа: [http://www.academia.edu/5340950/Evaluation\\_of\\_Railway\\_Vehicle\\_Car\\_Body\\_Fatigue\\_Life\\_and\\_Durability\\_using\\_a\\_Multi-disciplinary\\_Analysis\\_Method](http://www.academia.edu/5340950/Evaluation_of_Railway_Vehicle_Car_Body_Fatigue_Life_and_Durability_using_a_Multi-disciplinary_Analysis_Method) (дата обращения: 28.03.2018).

26 Ouyang, Shan. Experimental modal analysis of high-speed railway carriage [Электронный ресурс] / Shan Ouyang, Fusheng Sui // China. – Режим доступа: [https://www.acoustics.asn.au/conference\\_proceedings/INTERNOISE2014/papers/p1019.pdf](https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/INTERNOISE2014/papers/p1019.pdf) (дата обращения 24.04.2018).

27 König, Jens Methodology for force flow optimised car body structures and implementation [Электронный ресурс] / Jens König, Gerhard Kopp, Joachim Winter, Horst E. Friedrich, Martin Schön // 12th Stuttgart International Symposium. – Germany, 2012. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/225025710> Methodology\_for\_force\_flow\_optimised\_car\_body\_structures\_and\_implementation (дата обращения 24.04.2018).

28 Притыкин, А.И. Распределение и концентрация напряжений во флорах с овальными и круглыми вырезами / А.И. Притыкин // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 1-3 (37). – С. 29-34.

29 Лаврова, А.С. Экспериментально-теоретическое исследование жесткости и устойчивости перфорированных балок с круглыми вырезами / А.С. Лаврова, А.И. Притыкин // Известия КГТУ. – 2017. – № 46. – С. 151-162.

30 Лаврова, А.С. Моделирование местной устойчивости перфорированных балок с круглыми вырезами: расчеты методом конечных элементов и эксперименты на конструкциях из жести / А.С. Лаврова, А.И. Притыкин // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12. – № 10 (109). – С. 1115-1124.

31 Притыкин, А.И. Прогибы перфорированных балок с круглыми вырезами / А.И. Притыкин, А.С. Лаврова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 3 (50). – С. 94-102.

32 Притыкин, А.И. Отечественный и зарубежный подходы к оценке прогибов перфорированных балок / А.И. Притыкин, А.С. Лаврова // Строительная механика и расчет сооружений. – 2015. – № 6 (263). – С. 17-23.

33 Емельянов, К.А. Эмпирическая оценка местной устойчивости перфорированных балок с круглыми вырезами / К.А. Емельянов, А.И. Притыкин, А.С. Лаврова // Балтийский морской форум: сборник материалов VI Международного Балтийского морского форума: в 6 т. – Калининград, 2018. – С. 114-122.

34 Филимонов, В.И. Ослабляющая перфорация гнутых профилей / К.С. Дементьев, В.И. Филимонов // Инновации в технологиях формообразования листовых материалов и упрочнения технологической оснастки в авиационной и других отраслях промышленности: сборник трудов конференции. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – С.24-27.

35 Ильина, А.А. Прочность и устойчивость стальных изгибаемых элементов с регулярной и нерегулярной шахматной перфорацией стенки: дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / Ильина Анна Александровна. – Владимир, 2004. – 185с.

36 Соловьев, А.В. Анализ жесткостных характеристик перфорированных балок с круглой перфорацией стенки / А.В. Соловьев, И.А. Васюков // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – №3. – С. 36-38.

37 Заварзин, Д.Л. Сварные балки с круглой перфорацией стенки / Д.Л. Заварзин, И.С. Холопов, А.В. Соловьев // Проблемы оптимального проектирования сооружений: сборник трудов конференции. – Самара: СГАСУ, 2014. – С. 154-159.

38 Castellated and Cellular Beam Design / Sameer S. Fares, P.E., S.E., P. Eng, John Coulson, P.E., David W. Dinehart, Ph.D. // 31 Steel Design Guide; American Institute of Steel Construction. – 2016. – 117 p.

39 Jamadar, A.M. Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaped openings / A. M. Jamadar, P. D. Kumbhar // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2015. – Vol. 2. – № 2. – pp. 715 – 722.

40 Chhapkhane N.K., Shashikant R.K. Analysis of Stress distribution in castellated beam using finite element method and experimental techniques // Int. J. of Mechanical Engineering Applications Research, India. –2012. – 3(03). – pp.190-197.

41 Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 г.: утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 17.06.08 № 877-р.

42 Sarunac, R. Aluminum Railcar Design and Useful Life - Fatigue Assessment / R. Sarunac, P. Lorek // 8 – Technical Forums. – Vancouver. – 2010. – 8 p.

43 Wennberg, D. A Light Weight Car Body for High-Speed Trains / D. Wennberg. – Centre for ECO2 Vehicle Design at the Department of Aeronautical and Vehicle Engineering at KTH, 2009. – p. 56.

- 44 Endo, T. Development of Advanced Commuter Train for Tokyo Area / T. Endo, M. Korekoda, K. Suzuki. – Technical Development and Research Department East Japan Railway Company, Tokyo. – 9 p.
- 45 Kremer, K. Metal Foams for Improved Crash Energy Absorption in Passenger Equipment / K. Kremer; Final Report for High-Speed Rail IDEA Project 34. – Newark, 2004.
- 46 Лебедев, В.А. Обоснование технических решений конструкции двухэтажного пассажирского вагона: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Лебедев Владимир Александрович. – М., 2017. – 178 с.
- 47 Technical Proposal for MBTA RFP No. CAP 27-10 New Orange and Red Line Vehicles, 2014. – 319 с.
- 48 Bombardier: Coaches [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-vehicles/intercity-trains/coaches.html> (дата обращения 21.04.2017).
- 49 Пат. US 5388529 A. Rail vehicle body made of stainless steel /Philippe Tieberghien, Fernand Ramez, Max Lhommet, Michel Berquet; заявитель и патентообладатель Alstom Transport SA. - № 70679; заявл. 02.06.93; опубл. 14.02.95.
- 50 Jurdeczka, U. Concept for completeness checking of joined structures exemplified on rail vehicle car body shells / U. Jurdeczka // J. Sens. Sens. Syst. – 2017. – Vol. 6. – Is. 1. – pp. 53–63.
- 51 Шадур, Л.А. Развитие отечественного вагонного парка / Л.А. Шадур. – М.: Транспорт, 1988. – 279 с.
- 52 Шадур, Л.А. Вагоны: конструкция, теория и расчет / Л.А. Шадур, И.И. Челноков, Л.Н. Никольский, Е.Н. Никольский, П.Г. Проскурнев, В.Н. Котуранов и др.; под ред. Л.А. Шадура. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1980. – 440 с.
- 53 Светлов, В.И. Технические решения по механике пассажирских вагонов. Методы обоснования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Светлов Виктор Иванович. – М., 2002. – 201 с.
- 54 Годовой отчет ОАО «Тверской вагоностроительный завод» за 2017 год: утв. решением годового общего Собрания акционеров ОАО «ТВЗ» протокол от 18 июня 2018 года. – 33 с.

- 55 Дадыко, С.Р. Вагоностроение / С.Р. Дадыко, И.И. Драйчик. М.: Машгиз. – 1954. — 576 с.
- 56 Вагоны / М.В. Винокуров, Л.А. Шадур, П.Г. Проскурнев, А. И. Михалевский, В.А. Лазарян, Л.А. Коган, С.В. Вершинский, З. О. Каракашьян и др.; под ред. М.В. Винокурова. – М.: Трансжелдориздат, 1953. - 704 с.
- 57 Попов А.А. Графо-аналитические методы в инженерных расчетах на прочность. – М.: Машиностроение, 1964. 416 с. Попов А.А. Применение ортогональных фокусов к пластическому изгибу. // Сб.: Расчеты на прочность. – М.: Машгиз. 1958. - вып.3. - С. 210-215.
- 58 Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни. – М.: Физматгиз, 1959. – 574 с.
- 59 Власов, В.З. Избранные труды. Общая теория оболочек (том 1) – Москва: Издательство академии наук СССР, 1962. – 528 с.
- 60 Никольский, Е.Н. Оболочки с вырезами типа вагонных кузовов / Е.Н. Никольский – М.: Машгиз, 1963. – 312 с.
- 61 Расчет вагонов на прочность. Вершинский С.В. и др. Изд. 2-е Под ред. Л.А. Шадура – М.: Машиностроение, 1971. – 432 с.
- 62 Папкович, П.Ф. Труды по строительной механике корабля. в 2 т. – Л.: Судпромгиз, 1945, 1947 г. – 576, 640с.
- 63 Новожилов, В.В. Теория тонких оболочек. — Л., 1951. – 431 с.
- 64 Гольденвейзер, А.Л. Теория упругих тонких оболочек. – М.: Наука, 1976. – 512 с.
- 65 Муштари, Х. М. Нелинейная теория упругих оболочек / Х.М. Муштари, К.З. Галимов; Акад. наук СССР. Казан. филиал. – Казань: Таткнигоиздат, Ред. науч.-техн. лит., 1957. – 431 с.
- 66 Вольмир, А.С. Гибкие пластинки и оболочки. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956. – 419 с.
- 67 Argyris J., Kelsey S. Energy Theorems and Structural Analysis. — Butterworth Scientific Publications, London, 1960.
- 68 Turner M., Clough R., Martin H., Topp L. Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures. — J. Aeronaut Sci. – 1956. – No. 9. – p. 805- 823.

- 69 Розин, Л.А. Метод расчленения в теории оболочек / Л.А. Розин. ПММ, 1961. – т.25. – № 5. – с.921-926.
- 70 Розин Л.А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам. – М.: Стройиздат, 1977. – 129 с.
- 71 Оганесян, Л.А. Численный расчет плит / Л. А. Оганесян // Сб. «Решение инженерных задач на электронно-вычислительных машинах», ЦБТИ, ЛСНХ. – 1963. – с.85-97.
- 72 Корнеев, В.Г. Схемы метода конечных элементов высоких порядков точности. – Л: Издательство Ленинградского университета, 1977. – 208 с.
- 73 Постнов, В. А. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций / В. А. Постнов, И. Я. Хархурим. – Ленинград: Судостроение, 1974. - 341 с.
- 74 Сахаров, А.С. Метод конечных элементов в механике твердых тел / А.С. Сахаров, И. Альтенбах. – Киев: Вища школа, 1982. — 480 с.
- 75 Еременко, С.Ю. Метод конечных элементов в механике деформируемых тел / С.Ю. Еременко. – Харьков: «Основа», 1991. – 271 с.
- 76 Молчанов, И.Н. Основы метода конечных элементов / И.Н. Молчанов, Л.Д. Николаенко. – Киев: Наука думка, 1989. – 269с.
- 77 Образцов, И.Ф. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов / И.Ф. Образцов, Л.М. Савельев, Х.С. Хазанов. – М.: Высшая школа, 1985. – 392с.
- 78 Котуранов, В.Н. и др. Нагруженность элементов конструкции вагона. – М.: Транспорт, 1991. – 238 с.
- 79 Петров, Г.И. Динамика пассажирского вагона и пути модернизации тележки КВЗ-ЦНИИ / Под ред. А.А. Хохлова. М.: МИИТ. – 2001 г. – 160 с.
- 80 Петров, Г.И. Оценка безопасности движения вагонов при отклонениях от норм содержания ходовых частей и пути: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Петров Геннадий Иванович. – М., 2000. – 347 с.
- 81 Филиппов, В.Н. Расчет на прочность котлов цистерн для перевозки сжиженных газов / В.Н. Филиппов, А.В. Смольянинов, В.П. Мальцев // Газовая промышленность. – 1989. – №5. – С. 56-59.

82 Воронин, Н.Н. Анализ повреждаемости и оценка работоспособности несущих сварных конструкций грузовых вагонов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22. 07 / Воронин Николай Николаевич. – М., 1994. – 348 с.

83 Беспалько, С.В. Определение статической и динамической нагруженности грузового помещения цистерны для перевозки криогенных продуктов: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.22.07 / Беспалько Сергей Валерьевич. – М., 1990. – 22 с.

84 Овечников, М.Н. Решение проблемы снижения повреждаемости котлов и рам железнодорожных цистерн для перевозки нефтепродуктов с использованием современных программных средств моделирования и расчета конструкций: дис. ... д-ра техн. Наук / Овечников Михаил Николаевич. – М., 2001. – 388 с.

85 Проскурнев, П.Г. Исследования тонкостенной балки, применительно к конструкции вагона с цельнометаллическим кузовом: автореф. дис. ... канд. техн. наук/ Проскурнев Петр Григорьевич. – М., 1953.

86 Азовский, А.П. Исследования по применению метода конечных элементов к расчету кузовов вагонов (на примере котлов железнодорожных цистерн): автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.01 / Азовский Александр Петрович. – М., 1980. – 21 с.

87 Козлов, М.П. Расчет кузовной конструкции / М.П. Козлов // Мир транспорта. – 2009. –7 т. – №: 1 (25). – С. 76-80.

88 Лозбинец, В.П. Об одном способе уточненного расчета напряжений в оболочках кузовов вагонов с прямоугольными вырезами / В.П. Лозбинец // Вопросы строительной механики кузовов вагонов: сб. научн. тр. – Брянск: БИТМ, 1983 – С. 11-21.

89 Лозбинец, В.П. Актуальные направления исследований в области проектирования вагонов / В.П. Лозбинец, Ф.Ю. Лозбинец // Вестник БГТУ. – 2012. №1 – С. 41-49.

90 Серпик, И.Н. Модификация процедуры аппроксимации перемещений в методе конечных элементов / И.Н. Серпик: тез. док. 56-й науч. конф. проф.-препод. Состав; под ред. О.А. Горленко и И.В. Говорова // Брянск: БГТУ, 2002 – С. 142-144.

91 Бобров, М.В. Методика уточненного расчета напряженно-деформированного состояния трехслойной несущей системы рамы грузового

рефрижераторного вагона: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Бобров Михаил Васильевич. – Брянск, 1990. – 137 с.

92 Милакова, А.А. Разработка методики оптимизации кузовов вагонов с учетом ограничений по устойчивости несущих элементов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Милакова Анжела Алексеевна. – Брянск, 2001. – 160 с.

93 Сеницын, В.В. Разработка методики оценки несущей способности тонкой гофрированной обшивки кузовов вагонов: дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Сеницын Владимир Владимирович. – Брянск, 2002. – 100 с.

94 Деуля, А.А. Прямое моделирование НДС вагонов при маневровом соударении / А.А. Деуля, А.А. Ольшевский, В.В. Понятина // Механики XXI века. – 2012. – № 11. – С. 29-32.

95 Погорелов, Д.Ю. Введение в моделирование динамики систем тел: монография. – Брянск: БГТУ. – 1997. – 156 с.

96 Михальченко, Г.С. Совершенствование динамических качеств подвижного состава железных дорог средствами компьютерного моделирования / Г.С. Михальченко, Д.Ю. Погорелов, В.А. Симонов // Тяжелое машиностроение. – 2003. - №12. – С. 2-6.

97 Погорелов, Д.Ю. Алгоритмы моделирования динамики систем тел с большим числом степеней свободы / Д.Ю. Погорелов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – №4(2). – С. 278-279.

98 Бороненко, Ю.П. Комплекс программ для статических расчетов конструкций вагонов с применением метода суперэлементов (СУПЕР-С) / Ю.П. Бороненко, А.А. Битюцкий, А.В. Третьяков, О.Н. Петров, - В сб. Алгоритмы и программы. – М.: ВНИИЦ, вып.2, 1986. – 54 с.

99 Бороненко, Ю.П. Расчёт узлов вагонов на прочность МКЭ / Ю.П. Бороненко, А.В. Третьяков, Г.Е. Сорокин // Учебное пособие и руководство к использованию учебных пакетов программ. – Л.: ЛИИЖТ, 1991. – 39 с.

100 Битюцкий, А.А. Анализ напряженного состояния и совершенствование конструкций соединений несущих элементов кузова полувагона: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.05.01 / Битюцкий Александр Анатольевич. – Л.: ЛИИЖТ, 1984. – 19 с.

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

102 Соколов, М.М. Исследование прочности узлов и элементов вагонных конструкций. Метод. указания к УИР / М.М. Соколов, Ю.П. Бороненко, А.А. Эстлинг. – Л.: ЛИИЖТ, 1984. – 35 с.

103 Оганьян, Э.С. Расчеты и испытания на прочность несущих конструкций локомотивов: учебное пособие / Э.С. Оганьян, Г.М. Волохов – М.: УМЦЖДТ, 2013. – 326 с.

104 Волохов Г.М. Остаточный ресурс несущих металлоконструкций тягового подвижного состава: дис. ... д-ра тех. наук: 01.02.06 / Волохов Григорий Михайлович. – Орел, 2006. – 206 с.

105 Лапшин, В.Ф. Прогнозирование прочности и долговечности вагонов для перевозки коррозионно-активных грузов: дисс. ... д-ра. техн. наук / Лапшин Василий Федорович. – Екатеринбург: УрГУПС. – 2003. – 421 с.

106 Смольянинов, А.В. К вопросу обеспечения безопасности движения вагонов с увеличенной высотой центра тяжести / А.В. Смольянинов, В.Н. Филиппов, И. В. Козлов, Я.Д. Подлесников // Транспорт Урала. – 2014. – № 2 (41). – С. 39-43.

107 Ивашова, Т.В. Напряженно-деформированное состояние котлов цистерн с учетом воздействия коррозионно-активных грузов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Ивашова Татьяна Вячеславовна. – Екатеринбург: УрГУПС, 2003. – 22 с.

108 Павлюков, А.Э. Прогнозирование нагруженности ходовых частей грузовых вагонов повышенной грузоподъемности методами имитационного моделирования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Павлюков Александр Эдуардович. – Екатеринбург: УрГУПС. – 2002. – 48 с.

109 Цвик, Л.Б. Применение метода конечных элементов в статике деформирования: учеб. пособие для вузов по специальности «Прикладная математика»/ Л. Б. Цвик. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. – 1995. – 126 с. ил. 20.

110 Bubnov, V.M. Construction design and decision analysis of tank car / V.M. Bubnov, S.V. Myamlin, A.A. Nikitchenko, D.T. Lavrenko // Proceedings of the 11th mini conf. on vehicle system dynamics, identification and anomalies. – Budapest, 2008. – p. 301-308.

111 Мямлин, С.В. Улучшение динамических качеств рельсовых экипажей путем усовершенствования характеристик рессорного подвешивания: автореф. дис... д-ра техн. наук / Мямлин Сергей Витальевич. – Луганск. – 2004. – 37 с.

112 Лазарян, В. А. Динамика транспортных средств. Избранные труды / В. А. Лазарян. – Киев: Наукова думка, 1985. – 528 с.

113 Блохин, Е.П., Манашкин Л.А. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания)/ Е.П. Блохин, Л.А. Манашкин. – М.: Транспорт, 1982. — 222 с.

114 Ходовые части, ударно-тяговые приборы и тормозное оборудование пассажирских вагонов: учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / Л.В. Балон, О.А. Ворон, В.Ф. Криворудченко, С.Л. Самошкин, А.В. Челохьян, К.Д. Шевченко, редактор В.Ф. Криворудченко, Ростов-на-Дону, 2011. – 290 с.

115 Балалаев А.Н. Требования к конструкции пассажирского вагона из алюминиевых сплавов / А.Н. Балалаев, М.А. Паренюк, Е.С. Волочек // Наука и образование транспорту. – 2014. - № 1. С 3-6.

116 Лисевич, Т.В. Передовые технологии деповского ремонта пассажирских вагонов / Т.В. Лисевич, Е.В. Александров // Учебное пособие для вузов. — Самара: СамГАПС, 2005. — 80 с.

117 Wennberg, David. Orthotropic Models of Corrugated Sheets in Finite Element Analysis/ – 2011. [Электронный ресурс] / David Wennberg, Per Wennhage, Sebastian Stichel // Sweden. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/258403300\\_Orthotropic\\_Models\\_of\\_Corrugated\\_Sheets\\_in\\_Finite\\_Element\\_Analysis?ev=auth\\_pub](https://www.researchgate.net/publication/258403300_Orthotropic_Models_of_Corrugated_Sheets_in_Finite_Element_Analysis?ev=auth_pub) (дата обращения 24.04.2018).

118 A new generation of castellated beams / ArcelorMittal Europe: ACB® and ANGELINA™ beams. – 2015. – 64 p.

119 BS5950-1 Code of practice for design. Rolled and welded sections. British Standard Institution. 2000. – 48 p.

120 Модель 61-4447 [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.tvz.ru/catalog/passenger/item\\_detail.php?ELEMENT\\_ID=180](http://www.tvz.ru/catalog/passenger/item_detail.php?ELEMENT_ID=180) (дата обращения 24.04.2018).

- 121 Александров, А.В. Основы теории упругости и пластичности / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М.: Высшая школа, 1990. – 400 с.
- 122 Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. – М.: Машиностроение, 1978. - 312 с.
- 123 Сосновский, Л.А. Механика усталостного разрушения: словарь – справ. / Л.А. Сосновский. – Гомель, НПО Трбофатика, 1994. – Ч. 1-2. – 607 с.
- 124 Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с., ил.
- 125 Амензаде Ю.А. Теория упругости. – М.: Высшая школа, 1971.
- 126 Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич; пер. с англ. под ред. Б.Е. Победра. – М.: Мир, 1975 – 541 с.
- 127 Кякк, К.В. Выбор конструктивной схемы и параметров несущей конструкции железнодорожной платформы для перевозки крупнотоннажных контейнеров: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Кякк Кирилл Вальтерович. – Санкт-Петербург, 2007. – 145 с.
- 128 Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
- 129 Сирин, А. В. Оценка влияния степени дискретизации конечно-элементной модели на точность определения критерия подобия усталостного разрушения / А. В. Сирин // Транспорт: наука, техника, управление. – 2012. – №9. – С.13-16.
- 130 Перельмутер А.В. «Беседы о строительной механике». Научное издание. — М: Издательство SCAD Soft, издательство ассоциации строительных вузов, 2014. — 250 с.
- 131 Вовкушевский, А.В. Расчет массивных гидротехнических сооружений с учетом раскрытия трещин / А.В. Вовкушевский, Б.А. Шойхет. – М.: Энергия, 1981.
- 132 Антипин, Д.Я. Обоснование методики моделирования двухслойной обшивки боковых стен кузовов пассажирских вагонов при анализе их нагруженности / Д.Я. Антипин, А.М. Высоцкий, В.В. Кобищанов // Вестник Брянского государственного технического университета, 2013. – №3. – С. 10-13.

133 Кобищанов, В.В. Оценка динамической нагруженности отечественных пассажирских вагонов при аварийных соударениях поездов с препятствиями / В.В. Кобищанов, Д.Я. Антипин, С.Г. Шорохов // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием в трех частях. Часть 2. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2015. – С. 50-56.

134 Кобищанов, В.В. Обоснование динамической модели двухэтажного пассажирского вагона с упругим кузовом / В.В. Кобищанов, В.А. Лебедев, Д.Я. Антипин, С.Д. Коршунов // Вестник брянского государственного технического университета. – 2015. – №4 (48). – С. 50.

135 Антипин, Д.Я. Прогнозирование усталостной долговечности несущей конструкции кузова пассажирского вагона с перфорированными подкрепляющими элементами / Д.Я. Антипин, С.Н. Ашуркова // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 7(80). – С. 59-65.

136 Когаев, В.П. Прочность и износостойкость деталей машин: учеб. Пособ. для машиностр. спец. вузов / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.

137 Антипин, Д.Я. Прогнозирование усталостной долговечности и живучести сварных несущих конструкций пассажирских вагонов с учетом их нагруженности при движении: дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Антипин Дмитрий Яковлевич. – Брянск, 2004. – 165с.

138 Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие. - 3-е изд. перераб. и доп.; под ред. С.В. Серенсена. – М., Машиностроение, 1975. – 488 с. с ил.

139 Бирюков, И.В. Механическая часть тягового подвижного состава / И.В. Бирюков, А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак и др.; под ред. И.В.Бирюкова. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.

140 Гончаров, П.С. NX Advanced Simulation. Практическое пособие/ П.С. Гончаров, И.А. Артамонов, Т.Ф. Халитов, С.В. Денисихин, Д.Е. Сотник. – М.: МДК Пресс, 2014. – 112 с.

141 Ашуркова, С.Н. Выбор рациональной расчетной схемы для исследования напряженно-деформированного состояния кузова пассажирского вагона / С.Н. Ашуркова // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2016. – С. 30-32.

142 Ашуркова, С.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния кузова пассажирского вагона/ С.Н. Ашуркова, А.М. Высоцкий// Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: материалы VII Международной научно-практической конференции. – Брянск: БГТУ, 2015. – С.80 – 82.

143 Ашуркова, С.Н. Обоснование конечно-элементной модели для исследования напряженно-деформированного состояния кузова пассажирского вагона/ С.Н. Ашуркова, А.М. Высоцкий// Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке: сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. – Ижевск: ИННОВА, 2016. – С.880 – 885.

144 Рычков, С.П. MSC.visualNastran для Windows / С.П. Рычков. – М: НТ Пресс, 2004. – 212 с.

145 Металлоконструкция кузова пассажирского вагона модели 61-4447. Определение собственной частоты изгибных колебаний: протокол типовых испытаний. – Тверь: ЗАО НО «ТИВ», 2008. – 15 с.

146 Ашуркова, С.Н. Обоснование применения гибридных моделей кузовов пассажирских вагонов / С.Н. Ашуркова, Е.С. Чечулин // Современные инновации в науке и технике: сборник научных трудов 6-ой Международной научно-практической конференции. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. – С. 30-33.

147 Антипин, Д.Я. Обоснование динамических моделей для анализа нагруженности несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов / Д.Я. Антипин, С.Н. Ашуркова, Е.В. Чепикова // Будущее машиностроения России: сб. докладов девятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – С.695 – 697.

- 148 Отчет по определению массы и координат центра тяжести кузова вагона модели 61-4447. – Тверь: ОАО «ТВЗ», 2006. – 59 с.
- 149 Craig, R.R. Jr. Coupling of substructures for dynamic analysis: an overview / R.R. Jr. Craig // AIAA Dynamics Specialists Conference. – Atlanta, 2000.
- 150 Shabana, A.A. Flexible multibody dynamics: review of past and recent developments / A.A. Shabana // Multibody System Dynamics.- 1997 - № 1.-P. 189-222.
- 151 Селинов, В.И. Проектирование подвешивания вагонов: учеб. Пособие / В.И. Селинов. – Брянск: БГТУ, 1999. – 251 с.
- 152 Шорохов, С.Г. Обоснование технических решений обеспечения механической безопасности пассажирских вагонов при аварийных соударениях: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Шорохов Сергей Геннадьевич. – Москва, 2015. – 147 с.
- 153 Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств / В.Ф. Ушкалов, Л.М. Резников, В.С. Иккол и др.; под ред. В.Ф. Ушкалова. – Киев.: Наук. думка, 1989. – 240 с.
- 154 Ashurkova, S.N. Methods of analysis of the impact of design features of bodies of passenger cars on their stiffness and strength characteristics / S.N. Ashurkova, V.V. Kobishchanov, E.V. Kolchina // Procedia Engineering. – 2017. – Т. 206. – P. 1623–1628.
- 155 Ашуркова, С.Н. Исследование влияния конструкции подкрепляющего набора боковой стены пассажирского вагона на его технико-экономические показатели / С.Н. Ашуркова, А.М. Высоцкий, Д.Я. Антипин // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке: сб. материалов III Всерос. научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. – Ижевск: ИННОВА, 2015. – С.849 – 852.
- 156 Ашуркова, С.Н. Выбор рациональной несущей конструкции подоконного пояса кузова пассажирского вагона / С.Н. Ашуркова, Д.Я. Антипин // Молодежь как импульс в техническом прогрессе: материалы IV Международной научно-исследовательской конференции молодых ученых, аспирантов, студентов и старшеклассников. – Самара; Оренбург: СамГУПС, 2016. – С. 17 – 20.
- 157 Ашуркова, С.Н. Влияние конструкционных особенностей кузовов пассажирских вагонов на их прочностные характеристики / С.Н. Ашуркова //

Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения: материалы Междунар. научн. конф. молодых ученых. – Гродно: ГрГУ, 2017. – С. 121-123.

158 Антипин, Д.Я. Обоснование проектных решений конструкции боковых стен пассажирского вагона с гладкой обшивкой/ Антипин Д.Я., Ашуркова С.Н.// Приоритетные направления социально-экономического развития транспорта: сборник материалов Международной научно-практической конференции. – Курган: КИЖТ УрГУПС, 2016. – С. 164-166.

159 Ашуркова, С.Н. Анализ конструктивных схем боковой стены пассажирского вагона/ С.Н. Ашуркова// Проблемы и перспективы развития вагоностроения: материалы VII Всероссийской научн.-практ. конф. – Брянск: БГТУ, 2016. – С. 5 – 8.

160 Ашуркова, С.Н. Оценка прочностных характеристик кузова пассажирского вагона с подкрепляющими элементами перфорированного сечения / С.Н. Ашуркова // Перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей 8-й Международной научно-практической конференции. – Курск: Издательство ЗАО «Университетская книга», 2018. – С. 13-15.

161 Ашуркова, С.Н. Анализ несущей способности кузова пассажирского вагона с подкрепляющими элементами боковой стены перфорированного сечения/ С.Н. Ашуркова// Совершенствование транспортных машин: сб.науч.тр. / под ред. В.В. Рогалева. – Брянск: БГТУ, 2018. – С.177-180.

162 Ашуркова, С.Н. Обоснование конструктивных решений несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов с перфорированными подкрепляющими элементами / С.Н. Ашуркова, Д.Я. Антипин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 6(79). – С. 69-76.

163 Ашуркова, С.Н. Использование суперэлементов при исследовании несущей конструкции кузова пассажирского вагона с перфорированными профилями / С.Н. Ашуркова// Новые горизонты: материалы VI Международной конференции, посвященной 90-летию БГТУ/ под ред. О.М. Голембиовской. – Брянск: БГТУ, 2019. – С.4– 7.

164 Ашуркова, С.Н. Выбор рациональной несущей конструкции кузова пассажирского вагона с подкрепляющими элементами перфорированного сечения / С.Н. Ашуркова, Д.Я. Антипин // Транспорт Урала. – 2019. – № 2(61). – С. 23-27.

165 Никольский, Е.Н. Способ последовательного выделения областей с возрастающей плотностью сетки при расчетах по МКЭ систем с неравномерной сходимостью / Е.Н. Никольский. – Брянск: БИТМ, 1980. – 28 с.

166 Ашуркова, С.Н. Обеспечение устойчивости обшивки кузова пассажирского вагона/ С.Н. Ашуркова// Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых. – Курск: Издательство ЗАО «Университетская книга», 2017. – С. 156-159.

167 РД 32.68-96 «Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов. М.: ВНИИЖТ, 1997. – 20 с.

168 Изыскания и проектирование железных дорог: учебник для вузов ж-д. транспорта / А.В. Горинов, И.И. Кантор, А.П. Кондратченко, И.В. Турбин – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1979. – Т. I. – 319 с.

169 Сорокин, Е.С., Муравский Г.Б. Об учете упругих несовершенств материалов методами теории наследственной упругости / Е.С. Сорокин, Г.Б. Муравский// Строительная механика и расчет сооружений. – 1975. – №4 (100) – С. 52-58.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



Настоящим подтверждаем, что материалы диссертации соискателя по кафедре «Подвижной состав железных дорог» С.Н. Ашурковой «Обоснование проектных решений конструкции кузова пассажирского вагона с перфорированными подкрепляющими элементами» внедрены в учебный процесс на кафедре «Подвижной состав железных дорог».

Результаты теоретических и экспериментальных исследований оценки нагруженности несущей конструкции цельнометаллического кузова пассажирского вагона, имеющего перфорированные подкрепляющие элементы, используются при изучении дисциплин «Методы и промышленные программные комплексы оценки нагруженности несущих конструкций подвижного состава», «Конструирование и расчет вагонов» и «Надежность подвижного состава».

Зав. кафедрой «ПСЖД»  
 ФГБОУ ВО «Брянский государственный  
 технический университет»

 к.т.н., доц. А.А. Лагутина

**Рисунок А.1 – Акт внедрения материалов диссертации в учебный процесс**