

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Брянский государственный технический университет»
БГТУ

На правах рукописи



Герасимов Кирилл Вячеславович

Нагруженность кузова полувагона глухого типа при падении глыбы
груза

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и
электрификация

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Кобищанов Владимир Владимирович

Москва – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ...	9
1.1 Краткая история создания полувагонов в России.....	9
1.2 Современные тенденции производства полувагонов.....	10
1.3 Анализ надежности полувагонов.....	14
1.4 Обзор научных исследований, близких по тематике.....	16
1.5 Постановка задач.....	18
2 ПЕРВИЧНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ КУЗОВА ПОЛУ- ВАГОНА ГЛУХОГО ТИПА ПРИ ПАДЕНИИ В НЕГО ГЛЫБЫ ГРУЗА.....	20
2.1 Определение метода расчета и граничных условий.....	21
2.2 Обоснование пластинчато-стержневой схемы МКЭ кузова полувагона глухого типа.....	26
2.3 Результаты расчетов и выводы.....	36
2.4 Выводы по разделу 2.....	45
3 УТОЧНЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ КУЗОВА ПО- ЛУВАГОНА ГЛУХОГО ТИПА ПРИ ПАДЕНИИ ГЛЫБЫ ГРУЗА.....	47
3.1 Определение метода расчета и граничных условий.....	47
3.2 Обоснование пластинчатой пространственной схемы МКЭ кузова полувагона глухого типа	48
3.3 Проверка пространственной пластинчатой схемы МКЭ кузова полувагона глухого типа.....	50
3.4 Результаты расчетов и выводы.....	60
3.5 Выводы по разделу 3.....	68
4 ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НЕСУЩИХ СИСТЕМ КУЗОВОВ ПОЛУВАГОНОВ ПРИ ПАДЕНИИ В НИХ ГЛЫБ ГРУЗА.....	69
4.1 Обоснование пластинчато-стержневых пространственных схем МКЭ кузовов.....	70
4.2 Результаты расчетов и выводы.....	79

4.2.1 Напряженно-деформированное состояние кузова полувагона с разгрузочными люками.....	79
4.2.2 Напряженно-деформированное состояние кузова полувагона глухого типа.....	83
4.3 Анализ полученных результатов.....	88
4.4 Выводы по разделу 4.....	90
5. ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ КУЗОВА ПОЛУВАГОНА ГЛУХОГО ТИПА С РАЗЛИЧНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ ПОДКРЕПЛЕНИЯ НАСТИЛА РАМЫ.....	91
5.1 Определение метода расчета и граничных условий.....	91
5.2 Особенности нагруженности кузова полувагона глухого типа с подкреплением настила шестью гнутыми швеллерами.....	93
5.3 Особенности нагруженности кузова полувагона глухого типа с подкреплением настила шестью двутаврами №10.....	95
5.4 Особенности кузова нагруженности кузова полувагона глухого типа с подкреплением настила рамы четырьмя двутаврами №12...	97
5.5 Особенности нагруженности кузова полувагона глухого типа с составными упругими балками.....	100
5.6 Особенности нагруженности кузова полувагона с двухслойным настилом пола.....	105
5.7 Первичный расчет устойчивости элементов подкрепления настила пола.....	109
5.8 Анализ полученных результатов.....	111
5.9 Выводы по разделу 5.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	119

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время спад производства в вагоностроительной отрасли усилил конкурентную борьбу за покупателя. На рынке повысился спрос на вагоны высокого качества с новыми характеристиками и функциями.

Для грузовых вагонов важным показателем эффективности является суточная доходность, которая зависит от периода обращения единицы подвижного состава. Сократить его можно, уменьшив время на погрузочно-разгрузочные, маневровые работы и нахождение вагона на маршруте. Изменить последние два фактора производителю вагонов трудно, но на первый можно оказать влияние, создав конструкцию, способную выдерживать значительные нагрузки и высокий уровень интенсивности процесса погрузки.

Для этого необходим тщательный анализ влияния погрузочно-разгрузочных работ на каждый элемент несущей конструкции кузова и в первую очередь рамы, которая воспринимает значительную часть всех нагрузок, действующих на вагон.

Несмотря на наличие ГОСТ 22235–2010 «Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ» [1], «Норм...» [2], ГОСТ 33211–2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» [3] и других нормативных документов, определяющих проведение погрузочно-разгрузочных работ, уровень повреждаемости вагонов высок, особенно при падении в кузов глыбы груза.

Степень научной разработанности темы исследования. Исследованием падения тела занимались многие выдающиеся ученые, такие как Галилео Галилей. В вагоностроительной отрасли изучением ударного процесса занимались Е. Н. Никольский, А. В. Дарков, В. И. Сакало, Д. Ю. Погорелов, Е. М. Морозов и другие. Фундаментальный вклад в исследование динамики вагонов внесли С. В. Вершинский, М. Ф. Вериги, Л. А. Шадур, В. В. Лукин, В. В. Кобищанов,

Ю. П. Бороненко, А. П. Болдырев, В. Н. Котуранов, В. И. Селинов, Д. Я. Антипин и многие другие.

Наиболее близкими к теме являются работы Д. Г. Бейна [4–6], в которых раскрыты вопросы проверки прочности поддерживающих настил рамы балок кузова полувагона при падении груза с учетом прогиба тележек.

Целью данного исследования является обоснование конструкции рамы кузова полувагона глухого типа, способной воспринимать удар падающего груза без подсыпного слоя.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- моделировать процесс протекания удара несколькими методиками;
- создать пространственные схемы МКЭ различных типов несущих систем кузовов полувагонов;
- определить зависимости распространения напряжений в кузове полувагона и установить слабые элементы его конструкции;
- предложить конструктивные улучшения рамы кузова полувагона, направленные на снижение неблагоприятных последствий удара падающего груза.

В научной части работы приняты следующие ограничения: процесс погрузки глыбы груза рассматривается в пределах упруго-пластического деформирования стали, из которой изготовлены детали кузова полувагона; глыба груза принимается абсолютно жесткой.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) определено наряду с деформированным состоянием кузова полувагона на основании результатов его расчета на ударную нагрузку с приведением массы кузова к точке удара и вычисления коэффициента динамичности;
- 2) выявлены границы применения эмпирической зависимости для расчета времени ударного взаимодействия тел в зависимости от их характерных размеров;
- 3) в качестве эталонных значений напряжений принят динамический предел текучести стали 09Г2С;
- 4) выполнен анализ способности различных типов несущих систем кузовов амортизировать удар падающего груза без подсыпного слоя из мелких фракций;

5) исследованы конструкции подкрепления настила пола кузовов двумя двутаврами, четырьмя двутаврами № 12, шестью двутаврами № 10 и шестью гнутыми швеллерами 100х60х5 мм;

6) предложены два варианта конструкции рамы полувагона: с двухслойным настилом пола и с составными упругими балками.

Практическую и теоретическую ценность исследований можно выразить в следующих положениях:

1) созданы пространственные пластинчато-стержневые и пластинчатая модели кузовов полувагонов с различными типами несущих систем;

2) получены картины напряженно-деформированных состояний кузовов полувагонов при падении в них глыб груза без подсыпного слоя на раме;

3) реализована методика расчета на ударную нагрузку пластинчато-стержневых схем МКЭ кузовов полувагонов приведением массы кузова к точке удара и вычислением коэффициентов динамичности;

4) определены границы применения эмпирической зависимости для расчета времени ударного воздействия тел в зависимости от их характерных размеров при уточненном расчете напряжений, возникающих при падении груза на раму полувагона;

5) предложено несколько новых вариантов конструкций подкрепления настила рамы кузова.

Объектами исследования приняты полувагоны глухого типа модели 12-1592 и для сравнения – модель с разгрузочными люками 12-783; при изучении вариантов подкрепления настила пола рассмотрены конструкции рам грузовых крытых вагонов моделей 11-260 и 11-217.

Применялись две **методики исследования**: расчет кузовов на ударную нагрузку с приведением массы кузова к точке удара и вычислением коэффициента динамичности и численный неявный нелинейный динамический анализ контактной задачи падения глыбы груза на балки рамы кузова полувагона глухого типа.

Достоверность полученных результатов проверена многоуровневой верификацией:

– на первом этапе сопоставлялись напряжения, возникающие в элементах, расположенных в середине пластинчато-стержневых схем МКЭ и плоских моделей кузовов полувагонов при нагружении их по режимам, прописанным в ГОСТ 33211–2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» [3];

– на втором этапе сопоставлялись напряжения в элементах, расположенных в середине кузова полувагона глухого типа, полученные при нагружении по I и III режимам конечноэлементных пластинчато-стержневой и пластинчатой моделей;

– на третьем этапе напряжения, вычисленные в рамках конечноэлементных пластинчато-стержневой и пластинчатой моделей, сопоставлялись с результатами статических испытаний.

На защиту вынесены следующие положения:

1) исследования конечноэлементных моделей различных типов несущих систем кузовов полувагонов;

2) картины напряженно-деформированных состояний и амортизационные свойства рам кузовов полувагонов при падении в них глыбы груза;

3) две новые конструкции подкрепления рамы: составными упругими балками и гофрированным листом (двухслойным настилом).

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы доложены на двух всероссийских научно-практических конференциях «Проблемы и перспективы вагоностроения» V в 2014 и VII в 2016 годах, на VII международной научно-практической конференции «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании», на заседаниях кафедр «Подвижной состав железных дорог» БГТУ и «вагоны и вагонное хозяйство» МИИТ.

Публикации. Основные положения исследований опубликованы в 9 печатных работах, 3 из которых – в изданиях, входящих в перечень, рекомендуемый

ВАК, 1 – во всероссийском журнале, 1 – в сборнике, цитируемом в базе данных Scopus. Получены 2 патента на полезные модели конструкций настилов пола кузова полувагона глухого типа № 162477, № 116817.

Личный вклад соискателя заключается в разработке конечноэлементных пластинчато-стержневых и пластинчатой моделей кузовов полувагонов с различными вариантами подкрепления настила пола и одной модели с разгрузочными люками. В соавторстве созданы и запатентованы два варианта конструкций настила пола: с подкреплением гофрированным листом (двухслойный настил) и с подкреплением существующего настила составными упругими балками. Проведены расчеты кузовов на ударную нагрузку с приведением массы кузова к точке удара и вычислением коэффициента динамичности. Определены границы применения аналитической зависимости, применяемой для вычисления времени ударного воздействия через характерные размеры при численном неявном нелинейном динамическом анализе контактной задачи падения глыбы груза на балки рамы кузова полувагона глухого типа.

Ведущей научно-исследовательской организацией является ЗАО НО «Тверской институт вагоностроения»

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, пять глав, заключение, список использованной литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 129 страниц машинописного текста, содержит 13 таблиц и 80 рисунков, список использованной литературы включает 101 наименование.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность за оказанную помощь при проведении исследований:

- Дмитрию Яковлевичу Антипину за помощь в проведении исследовательских работ в вычислительной лаборатории кафедры «ПСЖД» БГТУ,
- Сергею Дмитриевичу Коршунову за помощь в получении экспериментальных данных по полувагонам;
- Дмитрию Юрьевичу Расину за консультации при создании моделей.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Краткая история создания полувагонов в России

Полувагон – один из самых распространенных типов грузовых вагонов в России и в мире.

Кузова полувагонов можно разделить по наличию разгрузочных люков в раме на два типа: с разгрузочными люками и глухого типа, у которого есть два небольших люка, предназначенных для слива конденсата.

В статье [7] появление первых полувагонов в России датируется 1861 годом. Это были вагоны для перевозки угля без крыши, все детали которых изготавливались из дерева.

В то же время были изготовлены полувагоны с металлическими несущими элементами кузова: балками рамы, стойками и обвязками боковых стен [8].

Детали цельнометаллических полувагонов «Фокс – Арбель» изготавливались методом штампования [9].

После Первой мировой и гражданской войн Россия с целью ускорения процесса восстановления промышленности закупала технологии и оборудование в США, в том числе техническую документацию, необходимую для проектирования и производства полувагонов [10].

В 20-е годы прошлого века началось внедрение в технологию изготовления кузовов сварки [10].

С 1928 года начался выпуск четырехосных полувагонов с 14-ю разгрузочными люками с хребтовой балкой «... из двух вертикальных металлических листов сечением 290x10 мм, армированных снизу угольниками 130x90x12 мм и перекрытых сверху изогнутой накладкой толщиной 8 мм и тавром 75x75x8 мм» [10]. Такая

конструкции применялась недолго и была заменена на сварную из двух зетов № 31 и двутавра № 19.

В первой половине 50-х годов XX века на Крюковском заводе был разработан шестионный полувагон, оборудованный торсионами для облегчения подъема разгрузочных крышек люков [10].

С 90-х по 2000-х годы использовались конструкции кузовов 70–80-х годов. В настоящее время существует немало новых конструкций полувагонов, разработанных конструкторскими бюро, научно-исследовательскими институтами и железнодорожными вузами.

1.2 Современные тенденции производства полувагонов

Главными целями отечественного вагоностроения являются:

- повышение пропускной способности железных дорог;
- сокращение затрат энергоресурсов на перевозку грузов и пассажиров.

ОАО «РЖД» сформулировал требования к конструкциям новых грузовых вагонов [11]:

- повышение нагрузки на ось до 30 т;
- снижение коэффициента тары;
- увеличение срока службы;
- снижение удельной материалоемкости на единицу грузоподъемности;
- повышение прочности и коррозионной стойкости элементов вагонов;
- применение новых устройств, снижающих динамические воздействия на железнодорожный путь;
- производство полувагонов в габарите Тпр.

В публикации [12] приведены рекомендации по совершенствованию конструкции полувагонов, предложенные докерами Мурманска в 2015 году:

– «Обеспечить абсолютно гладкое дно кузова из стали повышенной прочности.

– Усиленные стойки боковых стен внутри кузова должны выступать на минимальную величину над уровнем дна. В идеальном варианте предусмотреть их полное отсутствие...

– Зачистные люки должно располагаться на боковых стенах и открываться наружу, причём их число не должно превышать четырёх (с оптимальным расположением по всему периметру вагона). Дальнейшее увеличение числа люков нецелесообразно, так как время зачистки практически не уменьшится, при этом вырастет вес тары вагона, увеличатся претензии осматривающих ОАО «РЖД» к подвижным частям вагона».

В настоящее время производители изготавливают полувагоны с увеличенным объемом и осевой нагрузкой или модернизируют существующие [11].

Специалисты ОАО «НПК «Уралвагонзавод» успешно решили задачу по увеличению интервала межремонтных пробегов, создав полувагон модели 12-132-03, (рисунок 1.1) с конструктивными особенностями [11]:

- несущие элементы кузова изготовлены из стали класса прочности 390;
- усилена конструкция крышек разгрузочных люков;
- применен «подпружиненный запор механизма крышек люков»;
- усилен узел соединения балок рамы и стоек боковых стен.



Рисунок 1.1 – Полувагон модели 12-132-03

ОАО «РЖД» выдало заказ российским вагоностроителям создать полувагон нового поколения с увеличенным объемом кузова и осевой нагрузкой 25 т. На основании него было разработано несколько новых конструкций.

Полувагон модели 12-197-02 (рисунок 1.2), построенный на ОАО «НПК «Уралвагонзавод», имеет следующие особенности:

- увеличенную грузоподъемность и объем кузова;
- промежуточные стойки с переменной высотой поперечного сечения и закругленной заделкой;
- гладкую обшивку стен.

За счет этих конструктивных решений повышена усталостная прочность кузова и облегчена выгрузка сыпучего груза.



Рисунок 1.2 – Полувагон модели 12-197-02

Главной особенностью полувагона модели 12-9828 (рисунок 1.3) является отсутствие хребтовой балки в середине кузова, что позволило максимально использовать межтележечное пространство для увеличения внутреннего объема [11].



Рисунок 1.3 – Полувагон модели 12-9828

Полувагон 12-9833 с кузовом глухого типа создан на Тихвинском вагоностроительном заводе совместно с компанией Starfire Engineering&Technologies, Inc. В источнике [13] приведены его особенности: 13 промежуточных стоек; соединение по принципу шарнира верхних обвязок стен кузова, которое исключает силовой момент от действия распорной и продольной нагрузок. Такое соединение типично для США, а в отечественном вагоностроении ранее не применялось.

У компании ОВК есть предложение построить сочленённый полувагон с грузоподъёмностью 117 т, состоящий из двух кузовов, соединённых между собой специальным соединительным устройством [14].

С середины XX века ведутся работы по созданию полувагонов, элементы которых изготовлены из алюминиевых сплавов, например вагон BethGon II (рисунок 1.4), компании «Freight Car America». У этой же фирмы есть вагон Hybrid Gon, у которого рама и нижняя часть кузова - стальные, а боковые и торцевые стены – из алюминиевого сплава (рисунок 1.5) [15].

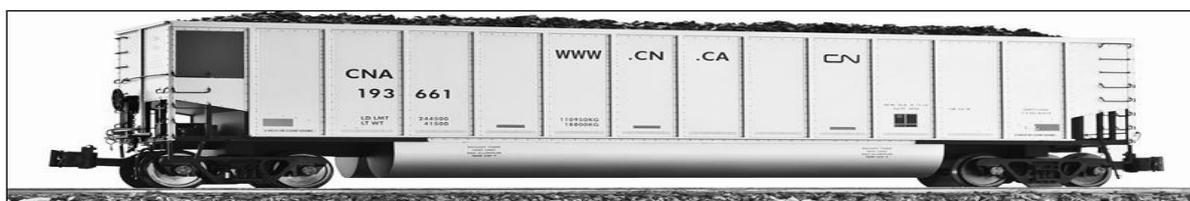


Рисунок 1.4 – Полувагон BethGon II компании «Freight Car America»



Рисунок 1.5 – Полувагон Hybrid Gon компании «Freight Car America»

Одной из особенностей североамериканских полувагонов является использование межтележного пространства: на рисунках 1.4 и 1.5 представлены продольные цилиндрические короба по обеим сторонам от хребтовой балки, которые увеличивают объем кузова и снижают центр тяжести вагона.

Существуют другие варианты конструкции настила пола, в которых продольные короба разделены на несколько частей поперечными балками [16].

В работе [17] приводятся данные, что в период с 2013 по 2015 годы из 51155 серийных полувагонов, построенных заводами СНГ, только 20866 имели тележки с осевой нагрузкой 25 т/ось.

Приведем характеристики нескольких моделей полувагонов с осевыми нагрузками 25 т/ось и 27 т/ось в таблице 1.1. [18]: 12-132-03, 12-197-02 производства ОАО «НПК «Уралвагонзавод»; 12-2143, 12-9869 – ОАО «Алтайвагон»; 12-9548 – ЗАО «ТВСЗ», 12-9893 – ОАО «РХМ» и 12-9828 – ЗАО «РВРЗ».

Таблица 1.1 – Характеристики полувагонов России

<i>Показатель</i>	<i>12-132-03</i>	<i>12-197-02</i>	<i>12-2143</i>	<i>12-9869</i>	<i>12-9548</i>	<i>12-9893</i>	<i>12-9828</i>
Грузоподъемность, т	69,5	76	77		82	84(76)	83
Объем, м ³	88	90	94	92	103	99	98
Удельный объем, м ³ /т	1,27	1,18	1,22	1,19	1,26	1,18(1,3)	1,18
Полезная погонная нагрузка, т/ось	4,99	5,46	5,53	5,53	5,89	6,03(5,46)	6,85
Длина, м	12,92						12,1
Габарит	1-ВМ	1-Т			Тпр		
Высота, мм	3787	3810	3722	3664	4100	3980	3950

1.3 Анализ надежности полувагонов

Интересные сведения о поврежденных вагонах приведены в публикации [19]: «... на путях необщего пользования было выявлено почти 30 тыс. повреждённых единиц, что на 14 тыс. больше, чем в 2005 г., и составило 88 % от общего количества выявленных и учтенных повреждённых вагонов на сети дорог.»

При этом, как признают специалисты, значительное число повреждений вагонов осталось не учтено документально [19].

В работе [19] отмечено, что многочисленные повреждения вагонов происходят при погрузке и разгрузке из-за нарушения ГОСТ 22235-2010, который запрещает погрузочным устройствам удары и опирания на элементы кузова. Но проведенные контрольные проверки [19] подтвердили, что, например, «при разгрузке грейфером одного полувагона с углем происходит от 40 до 60 ударов по кузову».

В работе [20] приведены данные, сведенные в таблицу 1.2, указывающие на то, что количество полувагонов, в том числе с поврежденными кузовами, из года в год растет.

Таблица 1.2 – Статистика поврежденных вагонов

В единицах

Год	Полувагоны	Всего поврежденных вагонов
2003	866	1160
2004	878	1197
2005	866	1247
2006	919	1281

До 95% вагонов повреждается на промышленных предприятиях металлургической и горнодобывающей промышленности и в морских портах [20].

Так, в 2011 году было выявлено 76,6 тыс. повреждённых кузовов вагонов (прирост по сравнению с 2010 годом 18,8 тыс. вагонов), из них на промышленных предприятиях повреждено 74,9 тыс. (увеличение на 19,2 тыс. ед.), а на железнодорожных предприятиях 1,6 тыс (снижение на 437 вагонов) [21].

В работе [22] отмечено, что за первое полугодие 2015 года 56648 кузовов полувагонов повреждены при эксплуатации на дорогах, в зоне обслуживания которых находятся морские порты и промышленных предприятия.

В публикации [17] проведен анализ ремонта эксплуатируемых полувагонов и отмечено, что «общий коэффициент отцепов грузовых вагонов не может в полной мере характеризовать надёжность, так как не учитывает в полной мере интенсивность эксплуатации вагона».

1.5 Обзор научных исследований, близких по тематике

Исследованию полувагонов, проведенных в МИИТ, ПГУПС, РГУПС, БИТМ(БГТУ), УрГУПС, СамГУПС, СГУПС и других организациях, посещено множество работ и охватить их все невозможно, поэтому выделим оказавшие непосредственное влияние на проведенные исследования, описанные в этой диссертации.

Исследованию полувагонов посвящены труды В. Н. Котуранова [23–25], В. Д. Хусидова [23, 26, 27] и А. А. Битютского [28–31].

В публикации И. И. Галичева [32] приведены результаты исследований влияния ходовых частей на нагруженность кузова полувагона. Динамические характеристики вагона изучались И. Э. Червяком [33] и И. Э. Ефимовой [34].

Исследование нагруженности кузова полувагона описано в труде В. М. Склярва [35]; совершенствовании конструкции – в трудах В. Д. Хусидова

и А. А. Битютского [23, 25 – 30], оптимизация кузова – в труде Д. Г. Бейна [4] и коррозионный износ – Ле В. Х. [36].

Ряд работ посвящен решению проблем, возникающих при производстве. Г. Г. Ултургашев в диссертации [37] раскрыл особенности проведения сборочных операций из деталей, выполненных с отклонениями размеров. Сварочные процессы при производстве полувагонов раскрыты в работах В. И. Ерыгина [38] и А. Ю. Богачева [39].

Исследованию рамы полувагона посвящено немало работ: конструкции рамы – работы В. Д. Хусидова [26], В. К. Красникова [40]; поперечных балок – работа И. Г. Стулишайко [41] и шкворневых – работа Р. И. Зайнетдинова [42].

Разгрузочные крышки исследованы В. Г. Дубровиным в труде [43]. В публикации А. В. Путято [44] приведены значения необходимых усилий для создания штамповонной крышки, удовлетворяющей требованиям нормативных документов.

К. О. Долгих определил значения вынуждающей силы накладной вибрационной машины [45]. Процесс вибровыгрузки полувагона описан в работе В. Ф. Лапшина [46], а А. И. Гребцовым в труде [47] предложен вариант разгрузки с помощью навесных воздуходувных устройств.

В труде И. А. Афанасьева [48] приведена анализ действия на кузов сил распора груза.

В публикациях А. Г. Нетеса [49] и Л. В. Заславского [50] приведена картина напряженно-деформированного состояния кузова полувагона при продольных ударах.

Исследование амортизации ударов грузовых вагонов приведено в работах Е. Н. Никольского [51], А. П. Болдырева [52], С. С. Андриянова [53].

Большое внимание уделено соединению стоек и балок полувагона в работах И. Г. Стулишайко [54], А. А. Битуцкого [31], А. Б. Сурвило [55], И. А. Хилова [56], С. А. Кузнецова [57] и В. М. Склярова [35].

Методикам расчета на нагрузки конструкций вагонов, в том числе полувагонов, посвящены труды В. В. Лукина [58], Л. А. Шадура [59], В. Н. Котуранова

[60], Е. Н. Никольского [61], В. Д. Хусидова [25], В. В. Кобищанова [62], В. П. Лозбинева [63] и других.

Опыт использования метода конечных элементов в вагоностроении приведен в работах Е. Н. Никольского [64], О. Е. Зенкевича [65], В. В. Кобищанова [66], А. В. Смольянинова [67].

Решение контактных задач при ударе конструкций, в том числе вагонов, описано в трудах Е. М. Морозова [68], В. И. Сакало [69] и А. П. Бабина [70].

Результаты многочисленных исследований конструкций полувагонов, опубликованы в форме патентов: на раму с подкреплением дна уголками [71] и на раму в межтележечном пространстве которой образовано понижение пола изогнутыми продольными балками [72]; на механизм открывания разгрузочных крышек люков внутрь кузова [73].

В 2010 году американский инженер Джеймс В. Форбс, (Калифорния) запатентовал идею конструкции настила рамы полувагона, выполненного из металлических контейнеров, напоминающих пластинку для изготовления льда в холодильнике [74].

1.5 Постановка задач

Актуальность исследований объясняется необходимостью производства вагонов, у которых высокая надежность при эксплуатации будет одним из преимуществ в острой конкурентной борьбе вагонопроизводителей за покупателей.

Для повышения прочности вагона выполняется большое число исследований, в ходе которых было подтверждено, что рама полувагона – одна из наиболее нагруженных частей кузова. Проведенный анализ научных работ и статистики повреждений показал, что еще осталось много проблем в конструкции

рамы, решение которых приведет к повышению надежности несущей системы кузова полувагона в целом.

Следовательно, целью данного исследования является обоснование конструкции рамы кузова полувагона глухого типа, способной воспринимать удар падающего груза без подсыпного слоя.

Для достижения поставленной цели необходимо провести исследования, в ходе которых предстоит решить следующие задачи:

- 1) моделировать удар падающего груза несколькими методиками;
- 2) создать пространственные расчетные схемы МКЭ кузовов полувагонов;
- 3) определить зависимости распространения напряжений в кузове полувагона и слабые элементы его конструкции;
- 4) предложить улучшения конструкции рамы полувагона, направленные на снижение неблагоприятных последствий от удара падающего груза.

Для успешного решения поставленных задач установим следующие ограничения:

- 1) протекание удара проходит в области упруго-пластинчатых деформаций стали;
- 2) удар груза одиночный, без подпрыгивания и повторного контакта;
- 3) опирание кузова полувагона смоделировано как опирание балки на две опоры;
- 4) не моделируются: тормозная система вагона, грузовые тележки вагона, элементы автосцепки, а также элементы крепления груза: кронштейны и увязочные скобы, а для полувагона с люками – разгрузочные крышки и элементы их крепления.

2 ПЕРВИЧНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ КУЗОВА ПОЛУВАГОНА ГЛУХОГО ТИПА ПРИ ПАДЕНИИ В НЕГО ГЛЫБЫ ГРУЗА

Решение научных и инженерных задач начинают с проведения первичных исследований и расчетов, которые подтверждают или опровергают наличие проблемы, оценивают ее масштаб и глубину. Расчеты опираются на методы, соответствующие упрощенным моделям объектов и воздействующих на них процессов. Но при этом они позволяют получить результаты с высокой для практики точностью и достоверностью.

Основные преимущества упрощенных моделей при решении задач:

- получение результата в сжатые сроки;
- применение базовых, общепринятых гипотез из физико-математических наук;
- в случае отсутствия научной проблемы или ее незначительности, затраты на исследования будут минимальны, а опыт проведенных работ будет полезен для учебных целей;
- возможность по результатам исследования принимать эффективные решения для локализации проблемы и минимизации ущерба.

Главный недостаток упрощенных моделей – ограниченность учета одновременно большого числа факторов, влияющих на протекание исследуемых явлений.

2.1 Определение метода расчета и граничных условий

Для исследования напряженно-деформированного состояния кузова полувагона при падении в него глыбы груза возможно применение двух методик расчетов. Их главным отличием является задание ударной нагрузки.

В первой методике она задается временем ударного взаимодействия тел и скоростью падения груза. Главным ее преимуществом является высокая точность получаемых результатов, а недостатком – сложность из-за применения систем дифференциальных уравнений высокого порядка и определения времени ударного взаимодействия.

Второй является методика расчета кузовов на ударную нагрузку с приведением массы кузова к точке удара и вычислением коэффициента динамичности, которую и применили для первичных расчетов [75, 76].

В данном исследовании удар создает изгибающие моменты в элементах конструкции кузова полувагона.

В учебнике [75] дано следующее определение нагрузки: «...ударная нагрузка – это динамическая нагрузка, быстро изменяемая во времени».

Методика расчета напряжений и перемещений с помощью коэффициента динамичности базируется на предположении, приведенном в [75], о том, что все точки несущей системы кузова полувагона приходят в движение после соприкосновения падающего груза с его рамой.

При определении перемещений в эпицентре удара используем гипотезу о жесткости системы [75], которая «... численно равна значению силы, вызывающей единичное перемещение сечения, в котором приложена сила».

При этом будем считать, что при соударении возникают усилия, вызывающие упруго-пластические деформации в элементах кузова полувагона.

Итак, динамические напряжения получим по следующей зависимости [75]:

$$\sigma_{\delta} = K_{\delta} \cdot \sigma_{ст}, \quad (2.1)$$

где K_{δ} – коэффициент динамичности;

$\sigma_{ст}$ – статические напряжения.

Коэффициенты динамичности определяются по формуле

$$K_{\delta} = \sqrt{1 + \frac{2 \cdot H}{k \cdot \delta_0}}, \quad (2.2)$$

где H – высота падения груза;

k – коэффициент приведения к точке удара массы кузова полувагона;

δ_0 в соответствии с учебником [75] – «перемещение точки удара от статически приложенной силы, равной весу груза, направленный по вектору скорости груза».

Трудоемкой и сложной задачей является приведение массы системы к точке удара, для решения которой в труде [75] приведена методика. При первичных исследованиях учет массы кузова полувагона глухого типа выполним без тормозного оборудования.

В расчетах пластинчато-стержневых систем на удар грузом используется расчетная схема кузова, у которого масса сосредоточена в точке удара, а не распределена по всем элементам кузова полувагона.

Приведение массы кузова к точке удара определяется из условия, что кинетическая энергия системы с приведенной к одной точке массой (T) должна быть равна кинетической энергии системы с распределенной массой (T_0):

$$T = T_0. \quad (2.3)$$

Для одного из конечных элементов, образующих нижнюю обвязку кузова полувагона глухого типа (рисунок 2.1), масса составляет:

$$dm = \rho \cdot dV, \quad (2.4)$$

где ρ – удельная плотность стали 09Г2С;

dV – объем конечного элемента.

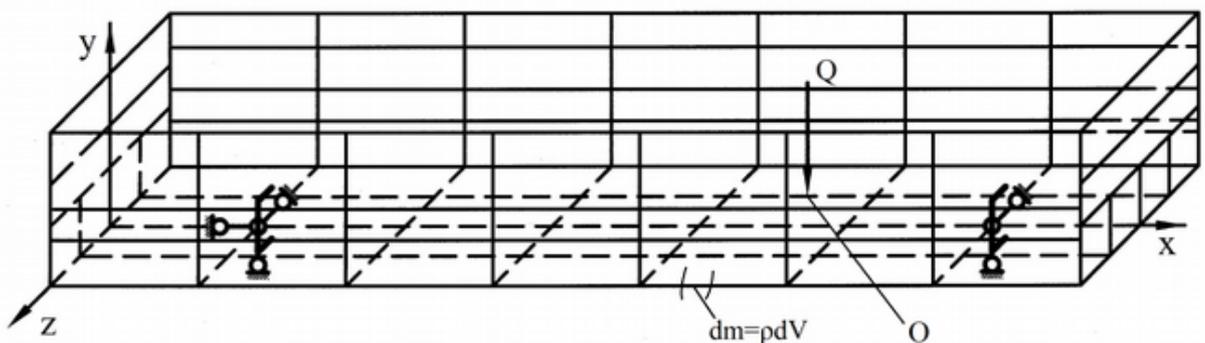


Рисунок 2.1 – Расчетная схема кузова полувагона глухого типа

При ударе модели кузова с распределенной по конечным элементам массой кинетическая энергия равна:

$$T = \frac{\rho}{2} \cdot \int dV \cdot v^2, \quad (2.5)$$

где v – скорость элементарной массы.

Кинетическая энергия при использовании схемы кузова полувагона с приведенной к точке удара O массой равна:

$$T_0 = k \frac{\rho}{2} \cdot v_0^2 \cdot \int dV, \quad (2.6)$$

k – коэффициент приведения массы кузова полувагона к точке удара; v_0 – скорость массы кузова, сведенной в точке удара.

Подставим в равенство (2.3) (2.5) и (2.6):

$$k \frac{\rho}{2} \cdot v_0^2 \cdot \int dV = \frac{\rho}{2} \cdot \int dV \cdot v^2;$$

$$k = \frac{\int v^2 \cdot dV}{v_0^2 \cdot \int dV}. \quad (2.7)$$

Воспользуемся предположением, приведенном в источнике [75], что: «скорость элементарной массы расчетной схемы пропорциональна ее перемещению».

Таким образом, формула (2.7) примет вид:

$$k = \frac{\int \delta^2(x,y,z) \cdot dV}{\delta_0^2 \cdot \int dV} \quad (2.8)$$

δ – перемещение перемещения конечных элементов от статически относительно осей x, y, z .

Таким образом, так как перемещения u по x и w по z на несколько порядков меньше, то выражение (1.8) примет следующий вид:

$$k = \frac{\int \delta^2(y) \cdot dV}{\delta_0^2 \cdot \int dV}. \quad (2.9)$$

Для конечноэлементной пластинчато-стержневой модели кузова полувагона выражение (2.9) примет вид:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2 \cdot dV}{\delta_0^2 \cdot \sum dV}. \quad (2.10)$$

Выражение для расчета коэффициента динамичности (2.2) примененное при к первичном исследовании:

$$K_{\partial} = \sqrt{1 + \frac{2 \cdot H \cdot Q_{zp}}{\delta_{cm} (Q_{zp} + k \cdot Q_{куз})}}, \quad (2.11)$$

где $Q_{куз}$ и $Q_{гр}$ – сила веса кузова и груза соответственно.

В учебнике [76] отмечается, что если $\frac{2 \cdot H}{\sigma_{cm}} \leq 100$, то расхождение результатов аналитических расчетов и натуральных испытаний не превышает 10%.

Условие прочности применительно к расчету по методу допускаемых напряжений [63] примет вид:

$$\sigma_{\partial} = K_{\partial} \cdot \sigma_{cm} \leq [\sigma], \quad (2.12)$$

где $[\sigma]$ – допускаемые напряжения для материала, из которого изготовлены элементы кузова полувагона.

Аналогично рассчитываются с помощью коэффициента динамики перемещения:

$$f_{\partial} = K_{\partial} \cdot f_{cm}, \quad (2.13)$$

где $f_{д}$ – динамические перемещения;

$f_{ст}$ – статические перемещения;

$K_{д}$ – коэффициент динамичности.

Статические перемещения и напряжения вычисляются при расчете конструкции на прочность при решении системы уравнений [77]:

$$[K] \cdot u = [f], \quad (2.14)$$

где $[K]$ — глобальная матрица жесткости;

$[f]$ — внешние силы;

u — перемещение.

Матрица жесткости рассчитывается по следующему выражению [77]:

$$[K] = [B] \cdot [B]^T \cdot [D], \quad (2.15)$$

где $[B]$ — матрица связи деформаций и узловых перемещений, индекс T означает, что матрица транспонированная;

$[D]$ – упругие константы.

Таким образом, общий алгоритм первичного исследования состоит из следующих действий:

- 1) формирования пластинчато-стержневой расчетной схемы МКЭ кузова полувагона глухого типа;
- 2) определения статических напряжений и перемещений в элементах кузова от веса груза;
- 3) расчета кузовов на ударную нагрузку с приведением массы кузова к точке удара и вычислением коэффициента динамичности и с его помощью поиск динамических напряжений и перемещений в кузове полувагона;
- 4) создания картины нагруженности кузова полувагона;
- 5) формулирования выводов и разработки рекомендации для уточненного исследования.

Исследование процесса удара проведем при следующих условиях:

- 1 Полувагон неподвижно стоит на железнодорожных путях.
- 2 Опираение кузова вагона на тележки смоделировано двумя шарнирами: подвижным и неподвижным. При этом тележка заменена связями, которые ограничивают перемещения в вертикальном (по оси абсцисс Y), горизонтальном (по оси ординат X) и поперечном (по оси аппликат Z) направлениях и повороте относительно оси Z .
- 3 Прогибы упругих элементов тележек после удара не учитываем.
- 4 Подсыпной слой на раме кузова полувагона из мелких фракций руды, предусмотренный ГОСТ 22235-2010 [1] для погрузки глыб грузов массой 500 кг с высоты 3 м, не учитывается.
- 5 Сыпучие и аморфные свойства глыбы груза не учитываются.
- 6 Глыба от балок рамы кузова после удара не отлетает.

2.2 Обоснование пластинчато-стержневой схемы МКЭ кузова полувагона глухого типа

Четырехосный специализированный полувагон грузоподъемностью 71 т с глухим кузовом модели 12-1592 (рисунок 2.2, [<http://scaletrainsclub.com/board/download/file.php?id=32513&mode=view>, дата обращения 19.01.2016]) предназначен для перевозки сыпучих, крупнокузовых грузов, не требующих защиты от атмосферных осадков, с разгрузкой на вагоноопрокидывателях.



Рисунок 2.2 – Полувагон глухого типа модели 12-1592

Полувагон состоит из кузова, ходовых частей, системы торможения и автосцепки [78].

В раму кузова входит набор сварных шкворневых, концевых, промежуточных балок и выполненные из профиля хребтовая и продольные поддерживающие настил пола балки.

Боковая стена состоит из каркаса, в состав которого входят верхняя и нижняя обвязки, набор промежуточных стоек и угловых полос, перекрытый обшивкой с периодическими гофрами.

Основой торцевой стены является каркас, состоящий из верхней и нижней обвязок, угловых стоек, набора полустоек и поясов жесткости, перекрыты гладкими листами 5-мм обшивки.

Материалом элементов несущей конструкции является сталь марок 09Г2Д, 09Г2С и 10ХНДП [78].

Ходовой частью вагона служат две двухосные грузовые тележки модели 18-100 [78].

Техническая характеристика полувагона модели 12-1592 представлена в таблице 2.1[78].

Таблица 2.1 – Технические характеристики полувагона модели 12-1592

Показатели	Значения
Грузоподъемность, т	71
Тара, т	21,3
Объем кузова, м ³	83
База вагона, мм	8650
Длина, мм: по осям сцепления автосцепок по концевым балкам рамы кузова внутри	13920 12700 12400
Ширина, мм: максимальная, кузова внутри	3134 2878
Высота, мм: от уровня головок рельсов кузова внутри	3474 2240
Коэффициент тары	0,3
Удельный объем, м ³ /т	1,17
Нагрузка от колесной пары на рельсы, тс	23,07
Конструкционная скорость, км/ч	120
Габарит по ГОСТ 9238-2013	0-ВМ (01-Т)
Высота автосцепки от уровня головки рельса:	1040...1080 мм

Исследование несущей системы кузова полувагона глухого типа модели 12-1592 проведено с использованием программного комплекса Siemens PLM Femap [77, 79].

Конечноэлементная модель кузова полувагона глухого типа представлена на рисунке 2.3.

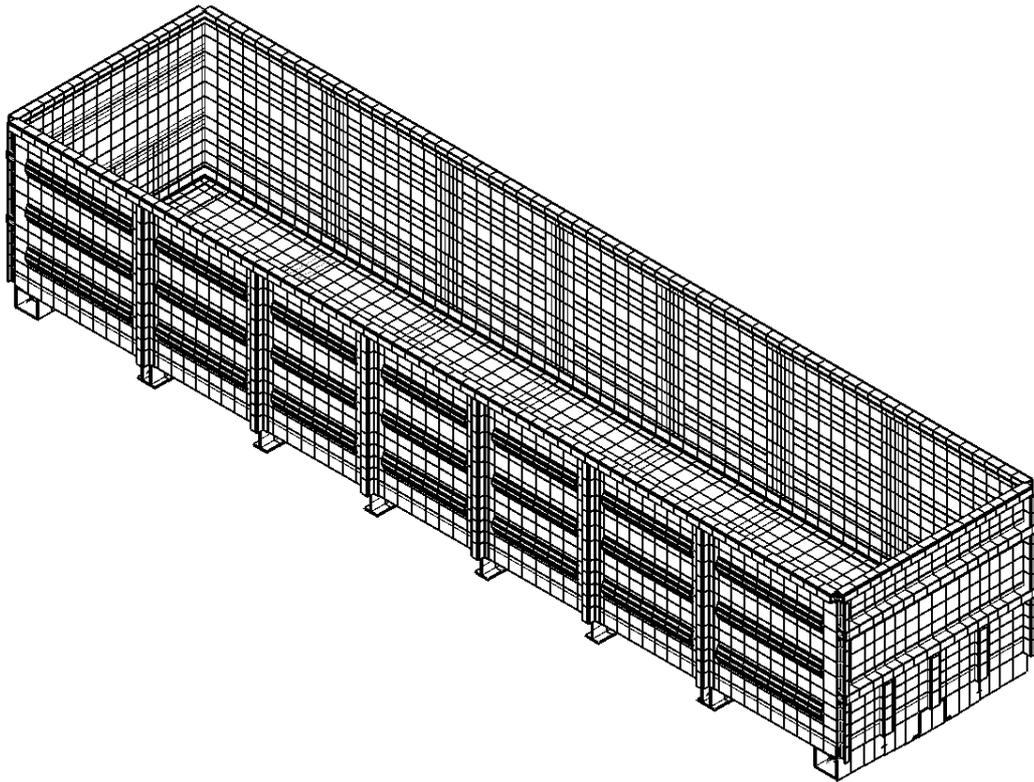


Рисунок 2.3 – Общий вид конечноэлементной модели кузова полувагона модели 12-1592

Не моделировались следующие элементы кузова полувагона.

В раме:

- система торможения и автостояночный тормоз: тормозные приборы, элементы воздушной магистрали, рычажная передача и детали ее крепления;
- автосцепное оборудование, автосцепка и элементы их крепления;
- два люка в раме, предназначенные для слива конденсата, с деталями их крепления;
- подножки на лобовых балках и опоры под домкраты, расположенные на нижних листах шкворневых балок.

В боковых и торцевых стенах не моделировались увязочные кольца и кронштейны для крепления грузов, а также наружные и внутренние лестницы, поручни и элементы их крепления.

Также не моделировались сварочные, резьбовые и клепанные соединения; части, усиливающие соединения между собой балок и стоек, привариваемые на стыках стен и рамы.

Пластинчато-стержневая модель кузова полувагона глухого типа выполнена из следующих элементов: линейных (одномерных) beam (элементов с постоянными по высоте поперечными сечениями) и tapered beam (элементы с переменной по высоте поперечными сечениями), работающих на изгиб, растяжение и сжатие; плоские (двухмерные) plate [77].

Пластинчато-стержневая модель кузова полувагона глухого типа имеет следующие особенности:

1) для учета геометрических характеристик поперечные балки рамы выполнены в виде набора из 16 стержневых элементов с разными по высоте поперечными сечениями (tapered beam): максимальной в узле соединения с хребтовой балкой и минимальной – в узле соединения с нижней обвязкой боковой стены;

2) шкворневой узел упрощен: скользуны и надпятник учтены за счет увеличения толщины его нижнего листа;

3) упрощен узел соединения верхних обвязок торцевых и боковых стен полувагона за счет увеличения геометрических характеристик их соединяемых участков;

4) элементы кузова полувагона, моделирующие стойки, пояса жесткости, обвязки и гофры выполнены стержнями (beam), прикрепленными абсолютно жесткими связями с учетом эксцентриситета элементов относительно обшивки стен и настила рамы;

5) при моделировании настила рамы полувагона проем под сливные люки не выполнялся;

6) обшивка боковых, торцевых стен и настил рамы выполнены прямоугольными пластинчатыми элементами (plate) шириной 102–150 мм и длиной от 85 до 235 мм;

7) всего стержневых элементов в модели – 1250 штук, пластинчатых – 2450, и она имеет $2,2 \cdot 10^4$ степеней свободы.

8) элементам кузова присвоены изотропные свойства стали 09Г2С [58].

Для проверки приемлемости разбивки конечных элементов модели кузова провели тестовые расчеты участка хребтовой балки длиной 1,71 м, разбитого на 8 частей, состоящего из двух № 31 и опирающегося на подвижный и неподвижный шарниры, приложив в его середине нагрузку 100 кН, аналитическим методом [75] и МКЭ, реализованным в программном комплексе Siemens PLM Femap.

Максимальные напряжения в поперечном сечении середины участка хребтовой балки равны [75]:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\text{изг}}}{W_y}, \quad (2.16)$$

где $M_{\text{изг}}$ — максимальный изгибающий момент в хребтовой балке;

W_y — осевой момент сопротивления поперечного сечения хребтовой балки.

Максимальный изгибающий момент в хребтовой балке равен [75]:

$$M_{\text{изг}} = \frac{F \cdot l}{4}, \quad (2.17)$$

где F — сила, приложенная к балке;

l — длина балки.

Результаты расчетов напряжений в точках 1 и 2 (рисунок 2.4) сведены в таблицу 2.2.

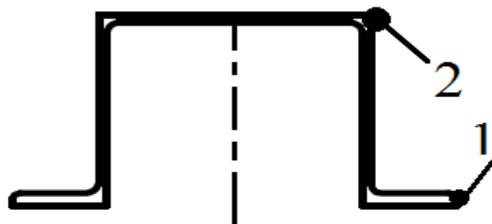


Рисунок 2.4 — Поперечное сечение хребтовой балки кузова полувагона

Таблица 2.2 – Напряжения в хребтовой балке, МПа

Точка	МКЭ	Расчет аналитическим методом	Погрешность, %
1	47,5	49,2	3,4
2	38	39	2,6

Таким образом, допустимо использовать пластинчато-стержневую модель кузова, выполненную конечными элементами с размерами 200 мм для решения поставленных задач.

Проверка пространственной пластинчато-стержневой схемы МКЭ кузова глухого типа проводилась сопоставлением нормальных напряжений, полученных при расчётах пространственной пластинчато-стержневой схемы МКЭ и плоской модели в элементах, расположенных по среднему сечению кузова.

При этом определены напряжения, возникающие в двух точках: в верхней, расположенной на верхней обвязке боковой стены, и в нижней - на нижней полке зетового профиля хребтовой балки рамы.

Для верификации выполнены расчеты по методике, изложенной в учебном пособии [63]. На обе модели наложены одинаковые связи, заменяющие тележки, и задействованы одностипные схемы приложения нагрузок, соответствующие I и III расчётным режимам ГОСТ 33211–2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» [3].

Расчетная схема представлена на рисунке 2.5.

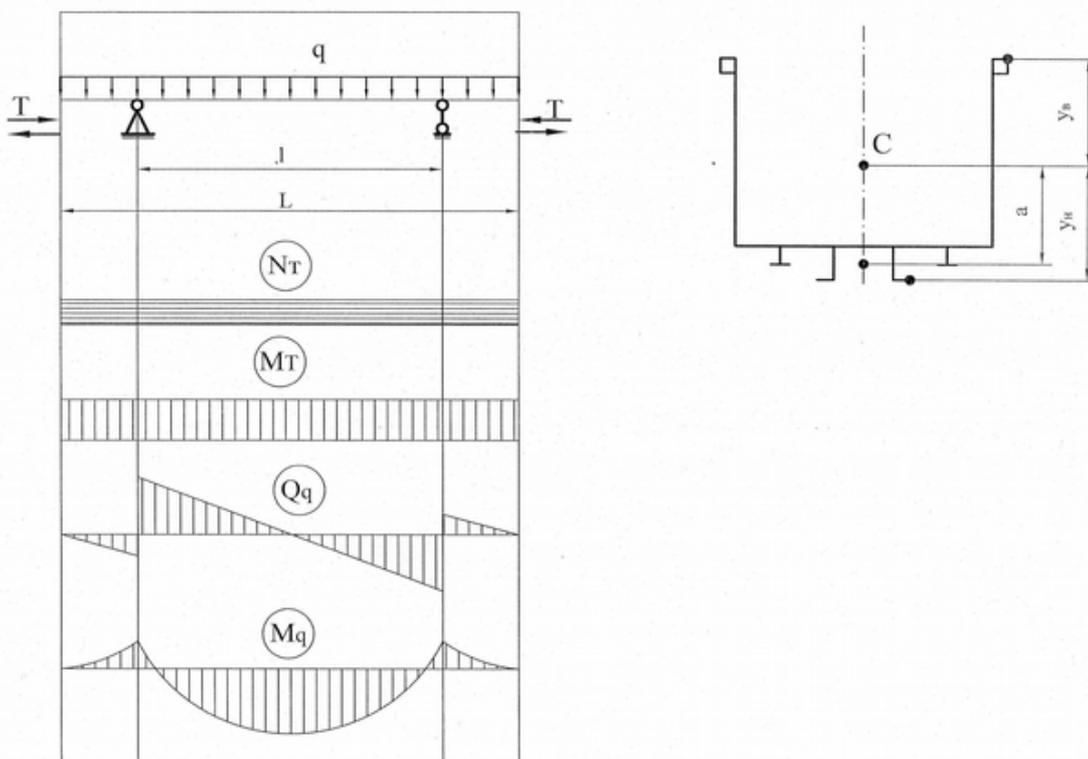
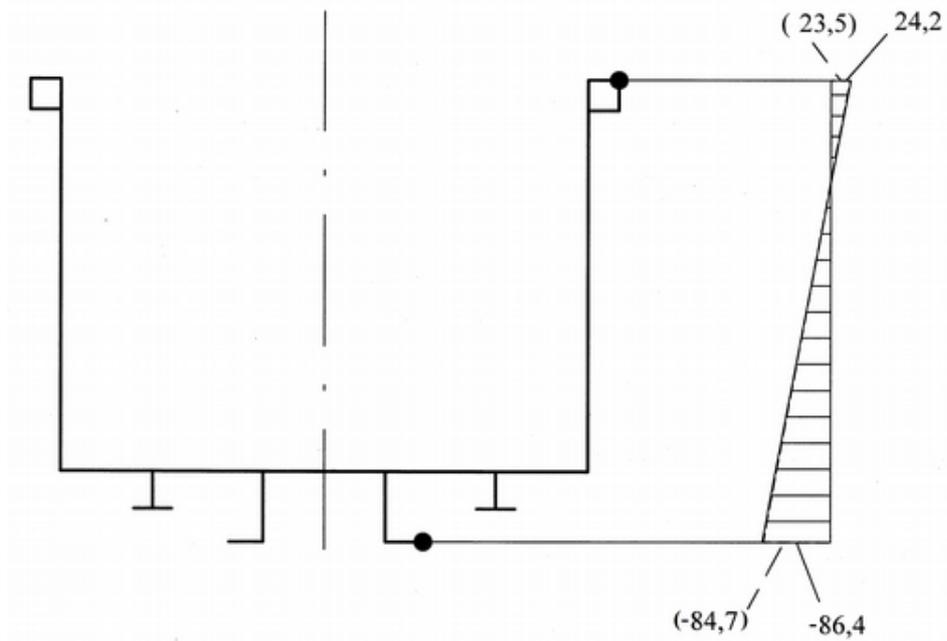


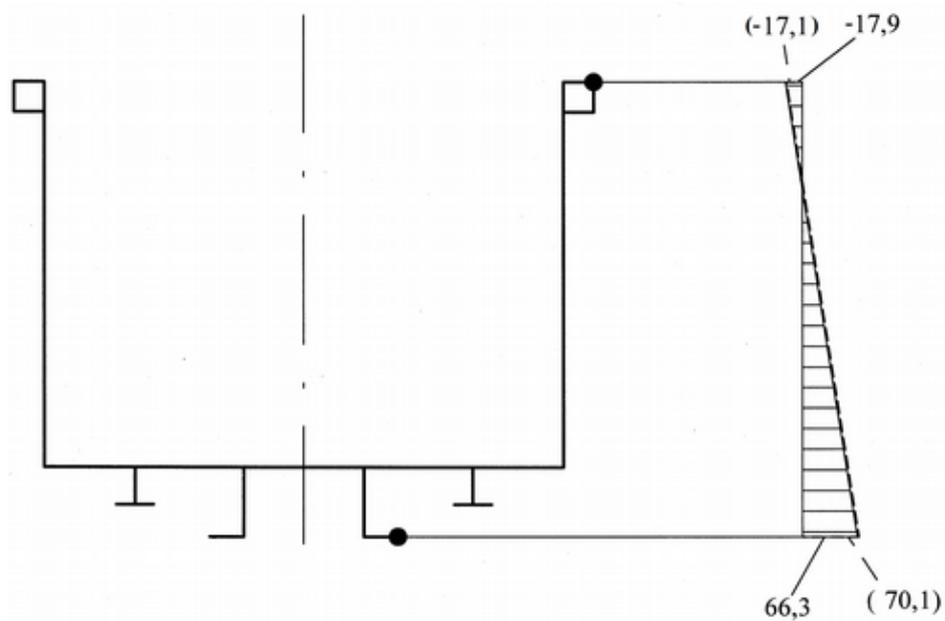
Рисунок 2.5 – Расчетная схема

Эпюры напряжений, полученных при расчетах, представлены на рисунках 2.6–2.11.



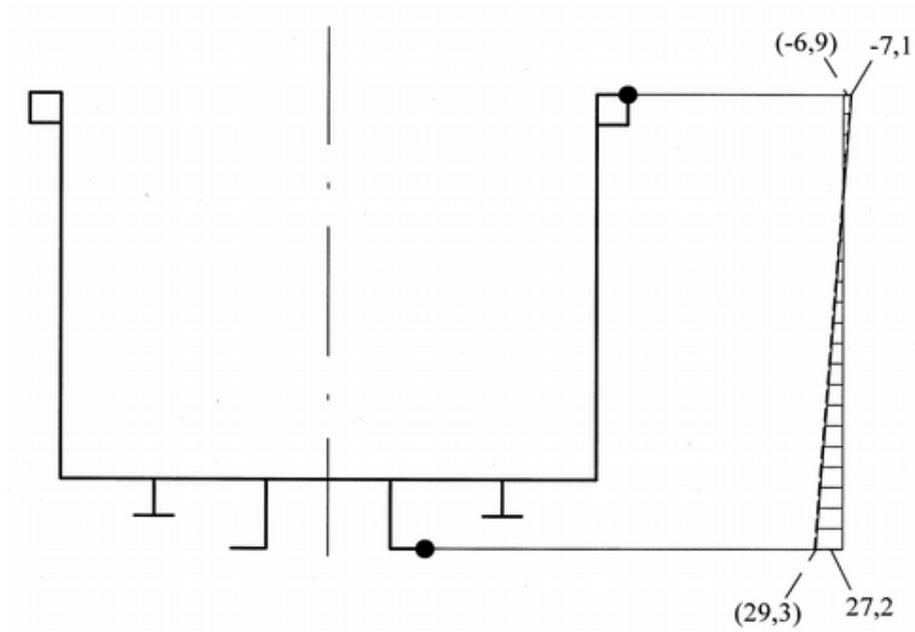
в скобках напряжения в плоской модели кузова полувагона; без скобок — в пластинчато-стержневой модели

Рисунок 2.6 – Эпюры напряжений при нагружении кузова по I а режиму сжимающей продольной нагрузкой



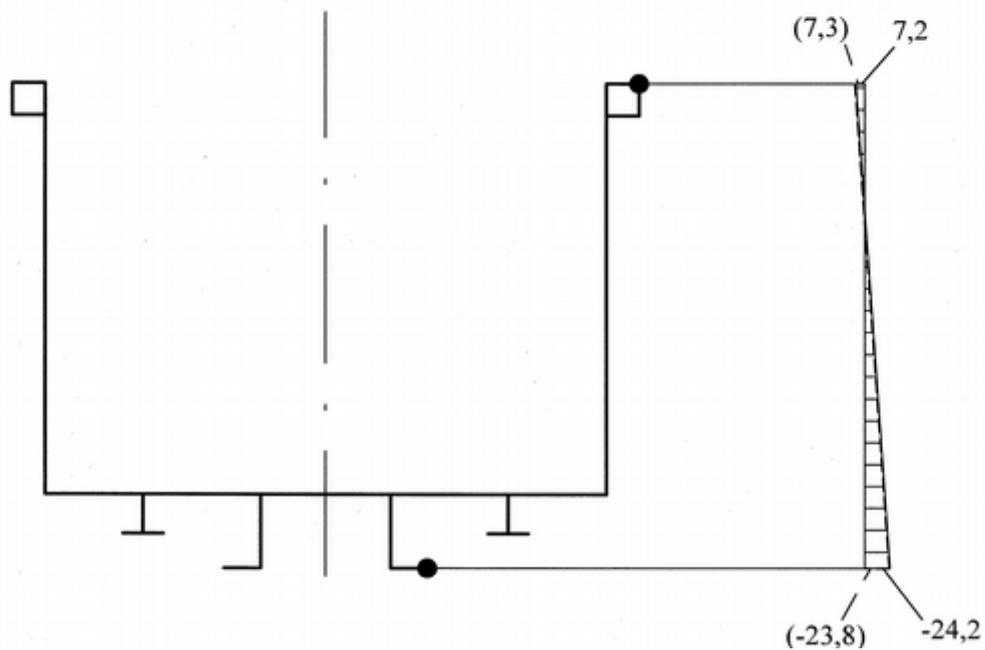
в скобках напряжения в плоской модели кузова полувагона; без скобок — в пластинчато-стержневой модели

Рисунок 2.7 – Эпюры напряжений при нагружении кузова по I б режиму растягивающей продольной нагрузкой



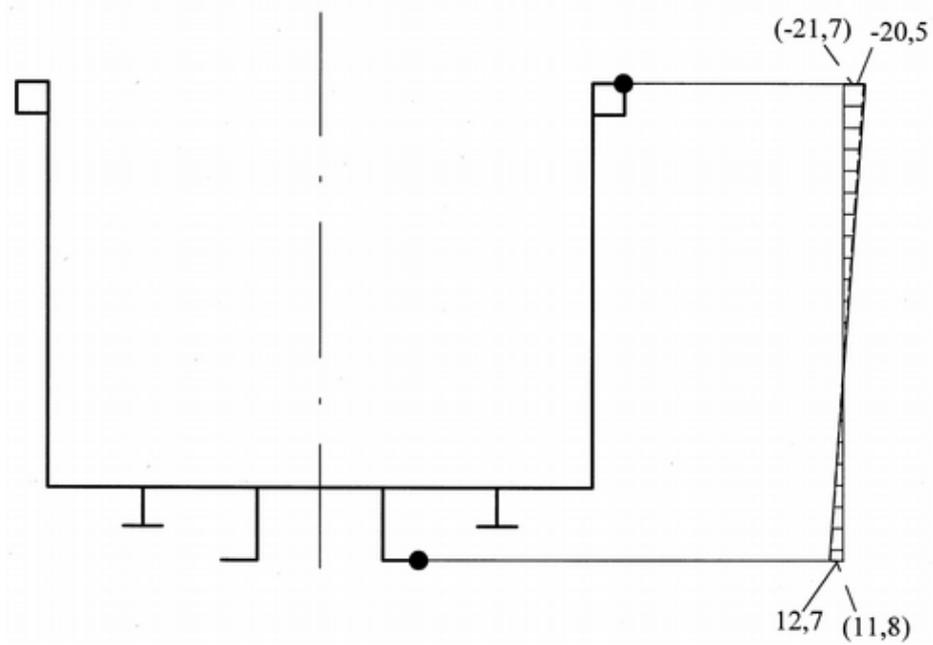
в скобках напряжения в плоской модели кузова полувагона; без скобок — в
пластинчато-стержневой модели

Рисунок 2.8 – Эпюры напряжений при нагружении кузова по III а режиму растягивающей продольной нагрузкой.



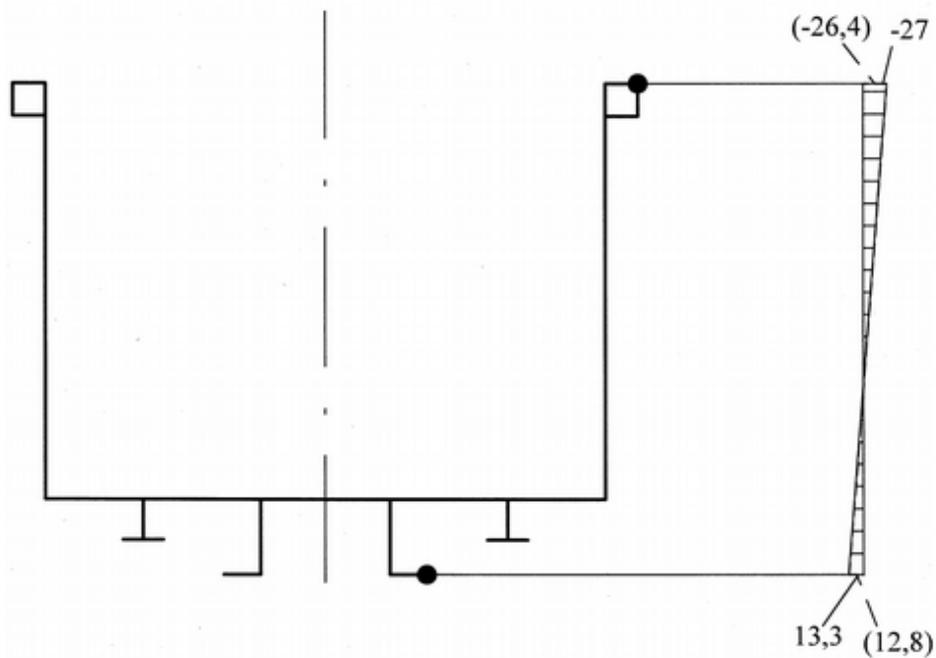
в скобках напряжения в плоской модели кузова полувагона; без скобок — в
пластинчато-стержневой модели

Рисунок 2.9 – Эпюры напряжений при нагружении кузова по III б режиму сжимающей продольной нагрузкой



в скобках напряжения в плоской модели кузова полувагона; без скобок — в
пластинчато-стержневой модели

Рисунок 2.10 Эпюры напряжений при нагружении кузова по I режиму
вертикальной нагрузкой



в скобках напряжения в плоской модели кузова полувагона; без скобок — в
пластинчато-стержневой модели

Рисунок 2.11 – Эпюры напряжений при нагружении кузова по III режиму
вертикальной нагрузкой

Разница между напряжениями в плоской и пластинчато-стержневой моделях не превышает 10 %.

В учебнике [58] приведены значения допускаемых напряжений в стали 09Г2С при расчетах конструкции вагонов по I и III режимам [3] (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Допускаемые напряжениями, в МПа

Название детали кузова	Расчетные режимы	
	I	III
Хребтовая балка	310,5	210
Шкворневая балка		
Нижняя обвязка	327,7	220

Как видно, напряжения значительно меньше допускаемых. Поэтому использование пластинчато-стержневой модели для дальнейших исследований допустимо.

2.3 Результаты расчетов и выводы

Перед исследованием падения груза необходимо назначить схему приложения нагрузки. Для этого проведена серия расчетов, при которых нагрузку прикладывали то к одному узлу балки, сосредоточив в нем всю силу веса 500 кг глыбы, то распределяли по нескольким узлам [80].

При первичном исследовании напряжений вес глыбы груза распределен по трем узлам середины балки и дает следующие преимущества:

1) моделировать распределенную силу по площадке 250x250 мм², рекомендуемой «Нормами...» [2] при проверки прочности балок;

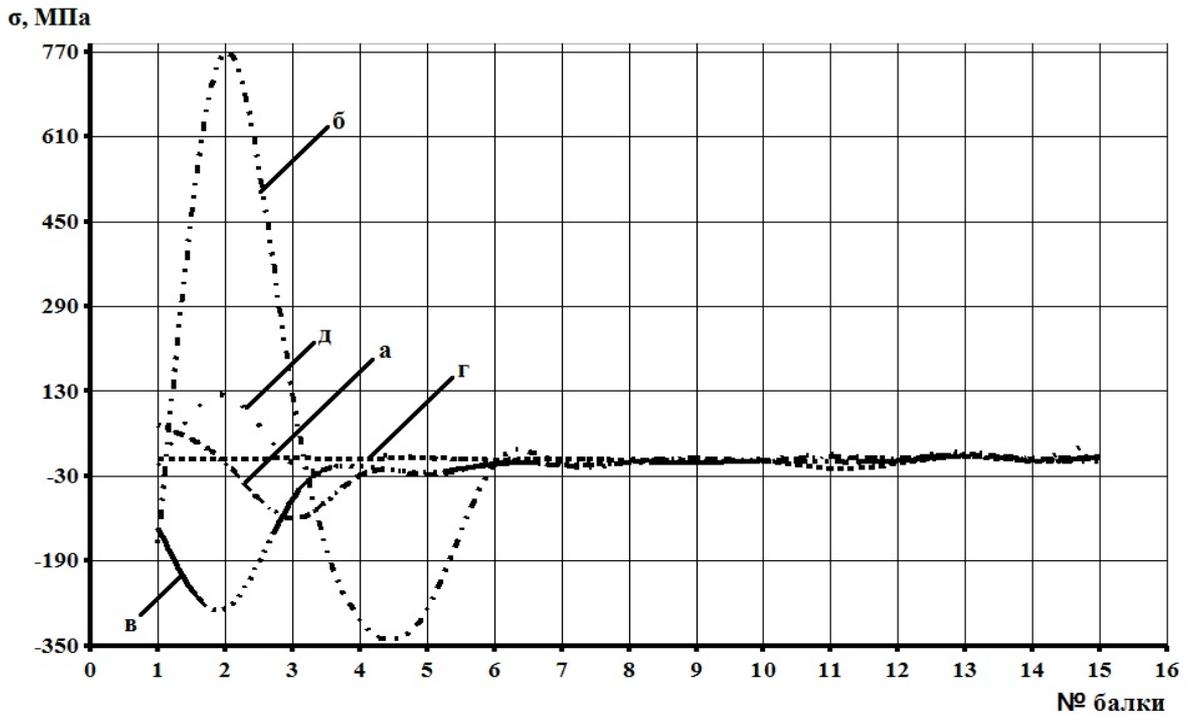
2) минимальное увеличение густоты сетки разбиения элементов в области приложения нагрузки, что не значительно искажает картину напряженно-деформированного состояния кузова полувагона в эпицентре удара [80].

В ходе исследования было смоделировано восемь случаев падения глыбы груза на различные балки рамы полувагона глухого типа, вычисленные при исследовании коэффициенты динамичности приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.4 – Коэффициенты динамичности

Наименование балки, на которую упал груз	K_d
Продольная поддерживающая, расположенная между концевой и шкворневой	91,07
Шкворневая	75,1
Продольная поддерживающая, расположенная между шкворневой и первой от нее промежуточной	85,2
Первая от шкворневой промежуточная	40,5
Продольная поддерживающая, расположенная между первой и второй от шкворневой промежуточными	45,2
Вторая от шкворневой промежуточная	29,5
Продольная поддерживающая, расположенная между второй и третьей от шкворневой промежуточными	40,5
Середина хребтовой	23,1

При первом исследовании удар глыбы направлен на участок продольной подкрепляющей настил рамы балки, расположенный между концевой и шкворневой балками. Напряжения, которые возникли в элементах кузова, представлены на рисунке 2.12.



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

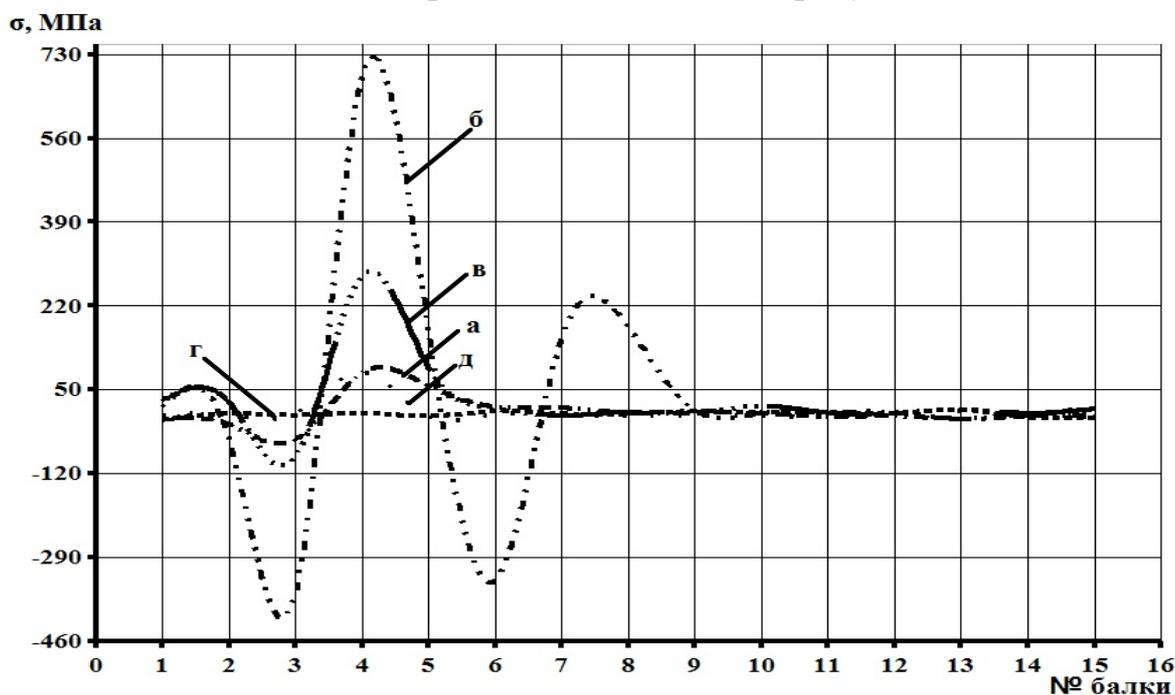
Рисунок 2.12 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на продольную поддерживающую балку между концевой и шкворневой балками

На оси абсцисс эпюр напряжений четными цифрами от 2 до 14 обозначены поперечные балки рамы, а нечетными от 1 до 15, кроме 9 (середина кузова), – участки продольных поддерживающих настил рамы балок. Нумерация балок начинается с участка продольной поддерживающей настил пола балки, расположенной между концевой и шкворневой балками.

При ударе в раме обнаружены прогибы вниз концов поперечных балок, соединенных с нижней обвязкой боковой стены вблизи с узлами, к которым приложена ударная нагрузка и стесненное кручение в хребтовой балке на расстоянии 4–5 м от точки падения груза.

Напряжения в балках, расположенных в области удара, сильно разнятся от 768 МПа в ударяемой продольной подкрепляющей настил рамы балке до 110 МПа на участке хребтовой, расположенном между концевой и шкворневой балками [80].

В третьем эксперименте груз бросали на продольную балку, расположенную между шкворневой и промежуточной балками. При этом напряжения в эпицентре удара составили – 684 МПа; в промежуточных балках до – 340 МПа; в ударяемой нижней обвязке – 287 МПа, а в хребтовой до – 90 МПа (рисунок 2.13).



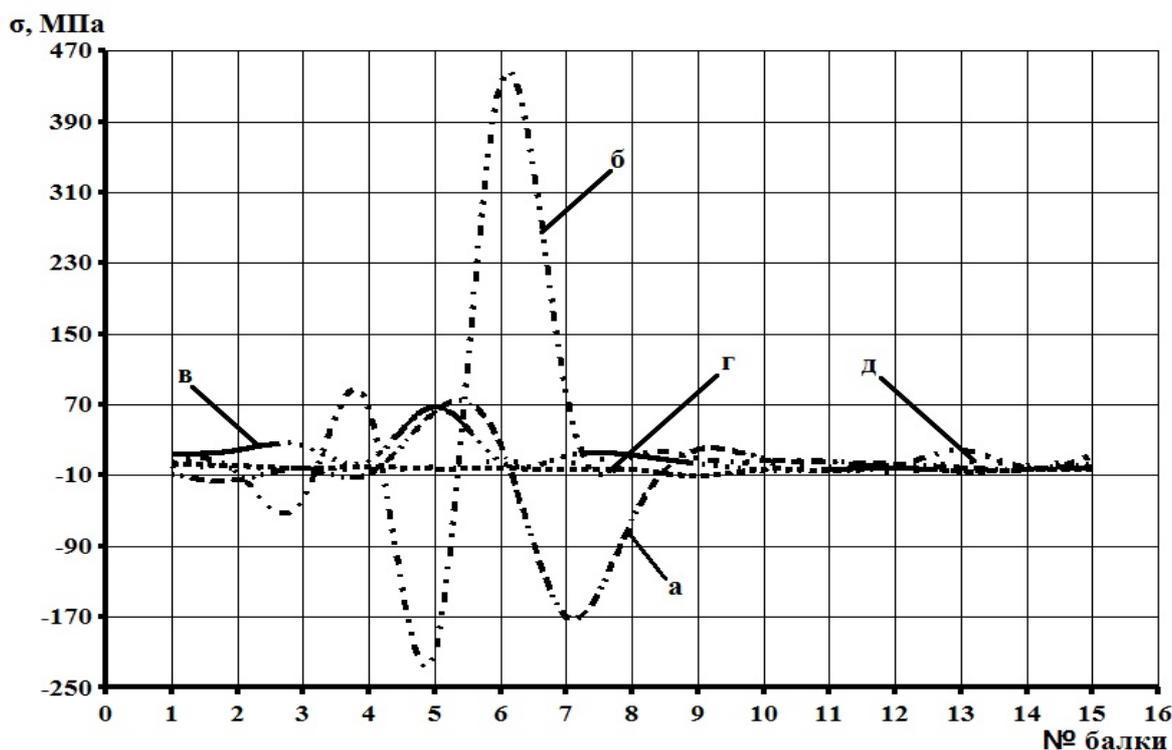
а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 2.13 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на продольную поддерживающую балку между шкворневой и первой от нее промежуточной балками

Консоль кузова, принявшая удар, оседает вниз, а противоположная поднимается вверх и неударяемые нижняя обвязка и подкрепляющая балка отгибаются вверх [80].

При падении глыбы на продольную балку, расположенную между первой и второй промежуточными балками, кузов полувагона поворачивается относительно своей продольной оси. Расположенный между шкворневой и третьей от нее промежуточной балкой, участок рамы, на которую приходится удар, оседает вниз; в области удаленного шкворневого узла присутствует стесненное кручение

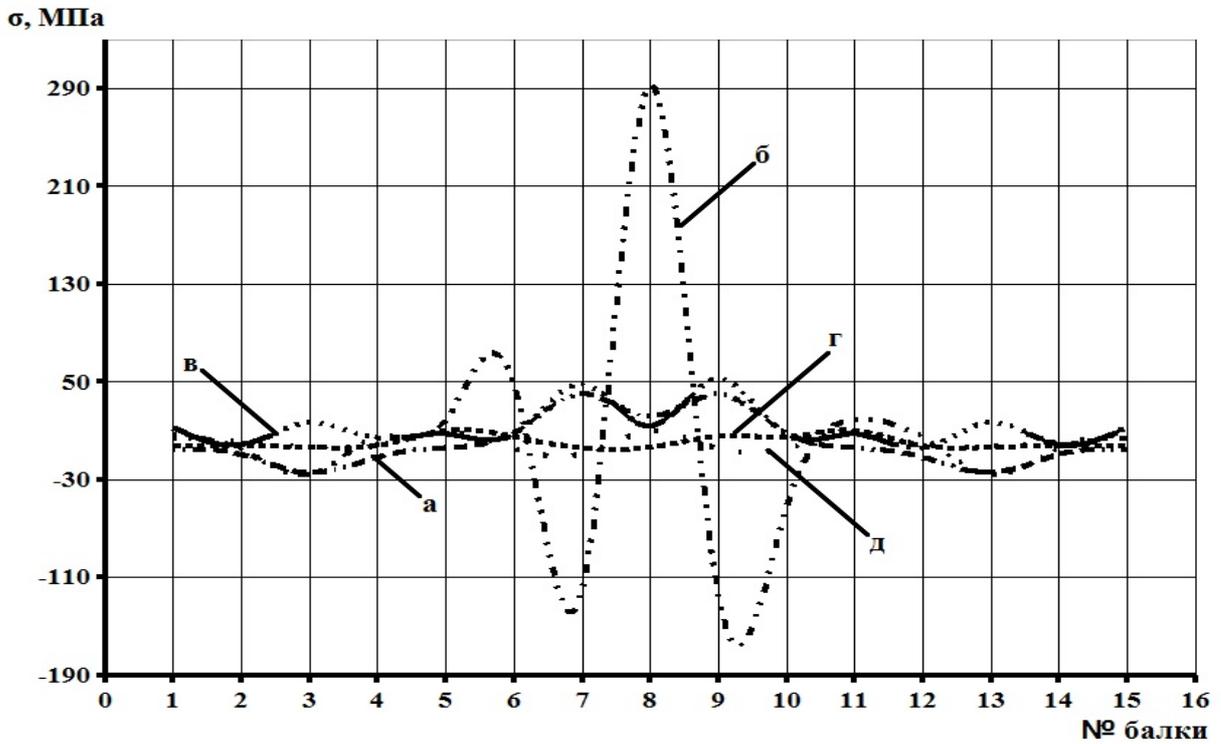
хребтовой балки. Максимальные напряжения в эпицентре удара достигают 433 МПа [81], а в концевых частях вагона – 25 МПа (рисунок 2.14).



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 2.14 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на продольную поддерживающую балку между первой и второй от шкворневой промежуточными балками

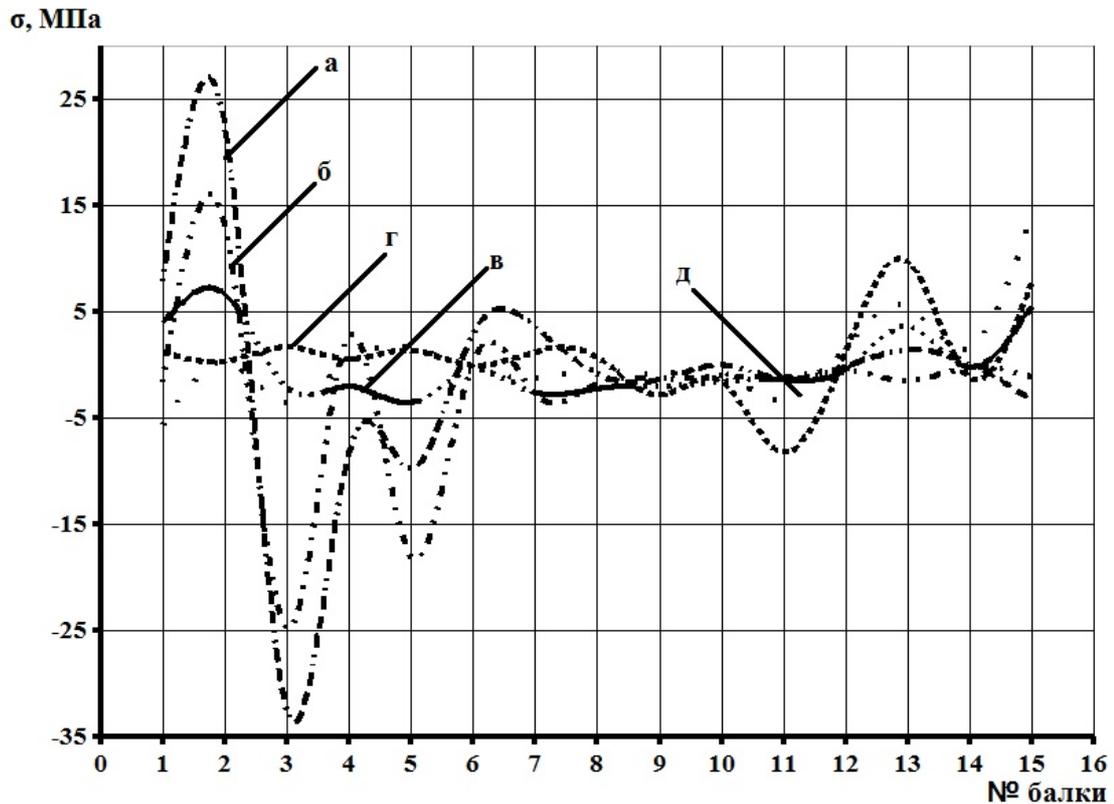
При расчете удара глыбой груза участка продольной поддерживающей настил балки между второй и третьей промежуточными выявлены следующие закономерности: кузов незначительно поворачивается относительно своей продольной оси в вниз; близлежащая к точке падения груза продольная часть, на длине базы вагона оседает, а угол удаленной консольной части отгибается вверх [80]. Напряжения в промежуточных балках рамы варьируются от 178 МПа до 78 МПа, а в поддерживающей балке в точке падения глыбы составляют 290 МПа [81] (рисунок 2.15).



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 2.15 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на продольную поддерживающую балку между второй и третьей от шкворневой промежуточными балками

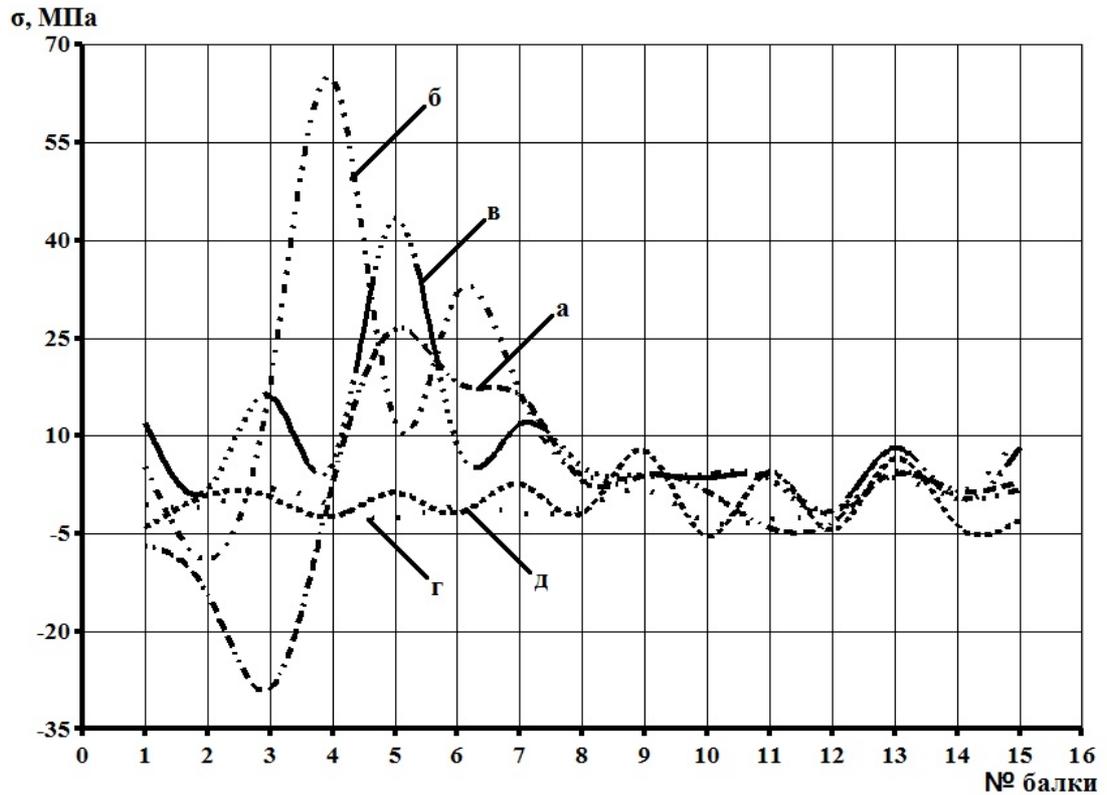
При ударе 500 кг грузом шкворневой балки угрозы опрокидывания кузова нет потому, что перемещение в эпицентре удара составляет 5 мм, а минимальный зазор между скользунами (9 мм), и его недостаточно для образования опрокидывающей реакции опоры [81]. Напряжения, полученные при расчете, приведены на рисунке 2.16.



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

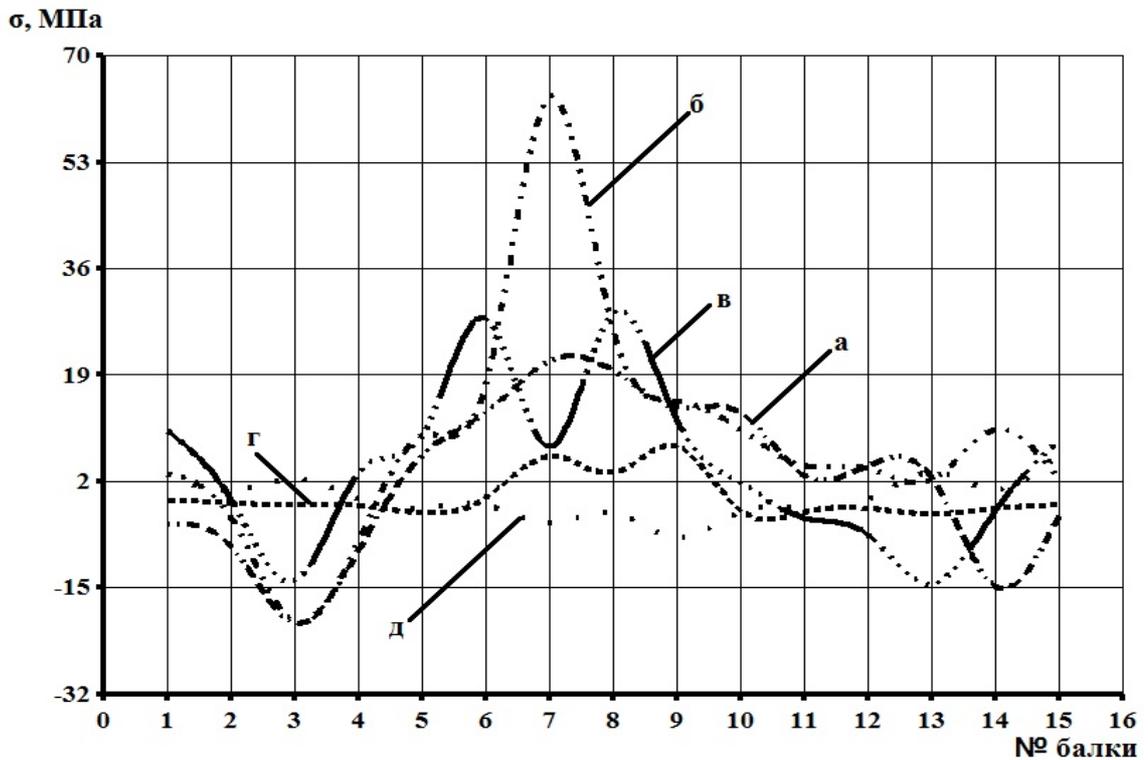
Рисунок 2.16 Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на шкворневую балку

Падения глыб на первую (рисунок 2.17) и вторую (рисунок 2.18) от шкворневой промежуточные балки дают схожие картины напряженно-деформированного состояния кузова полувагона глухого типа: в эпицентре удара напряжения достигают 65 МПа и 63 МПа соответственно; в близлежащих поперечных балках и нижней обвязке – 50 МПа, а их части прогибаются вниз. В хребтовой балке на расстоянии 3,5 м от удара наблюдается стесненное кручение, а элементы, образующие консольную часть рамы, удаленную от точки приложения ударной нагрузки, выгибаются вверх, при этом в их сечениях возникают напряжения 20 МПа.



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

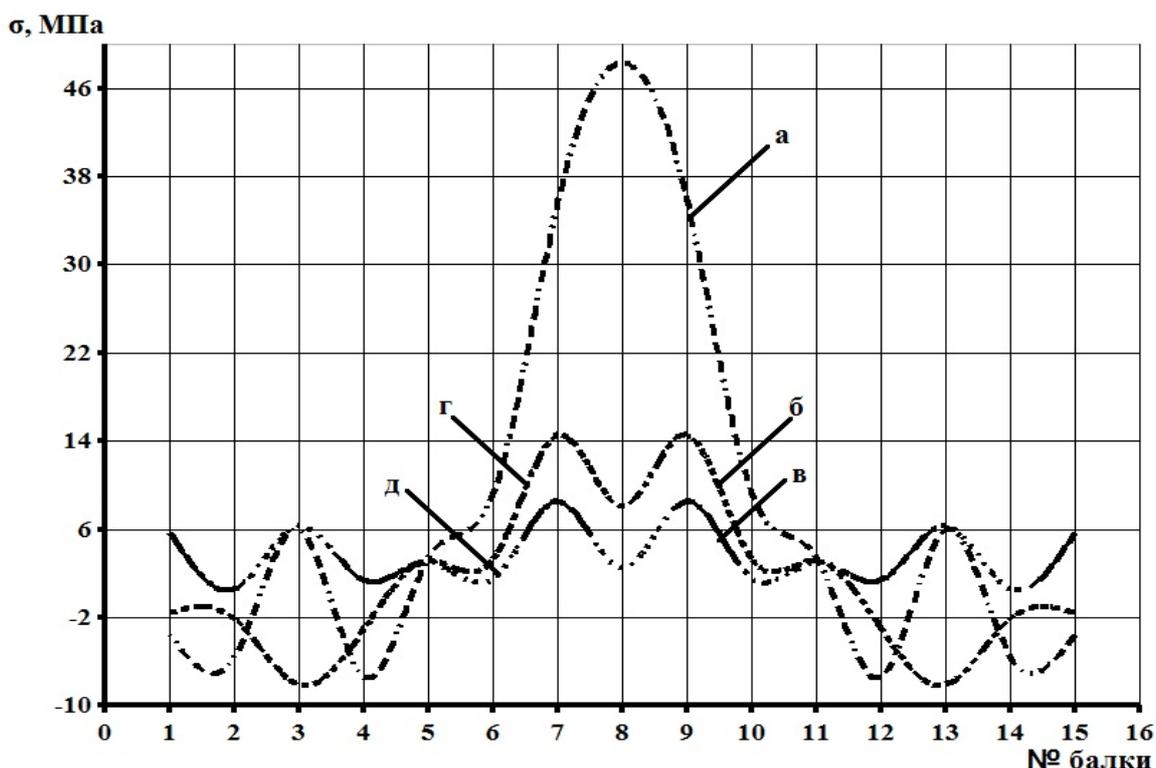
Рисунок 2.17 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на на первую от шкворневой балку



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 2.18 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на вторую от шкворневой балку

Значения напряжений при падении груза на середину хребтовой балки достигают в точке приложения силы 48 МПа (рисунок 2.19). Эпюры напряжений в балках рамы кузова симметричны относительно поперечной плоскости его сечения. Кузов полувагона прогибается вниз в середине, при этом консоли неподвижны, а полушпангоуты, образованные второй и третьей от шкворневой промежуточными балками и стойками боковой стены, выгибаются наружу.



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 2.19 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на хребтовую балку

Картины напряженно-деформированного состояния кузова полувагона глухого типа при падении глыбы груза на балки рамы приведены в работе [80]:

«Во-первых, чем ближе точка удара глыбы к концу кузова, тем напряжения в продольной поддерживающей балке выше.

Во-вторых, разница в 10–15 раз между напряжениями, полученными в продольных и поперечных балках, связана, прежде всего, с областью падения глыбы. Удар приходился на крестовину образованную продольными и поперечными элементами рамы».

В-третьих, наибольшие напряжения и перемещения локализованы между соседними поперечными балками, расположенными в радиусе до трех метров от эпицентра удара. Например, в точке приложения ударной нагрузки в продольной

поддерживающей настил пола балке, расположенной между концевой и шкворневой балками, составляют 768 МПа.

В-четвертых, наибольшие перемещения балок рамы возникают при ударе глыбы в продольную поддерживающую балку, расположенную между концевой и шкворневой балками, и составляют 11,5 мм.

В-пятых, стесненное кручение в хребтовой балке возникает в шкворневом узле, удалённом от удара, при падении глыбы груза на продольную поддерживающую балку, расположенную между шкворневой и первой от нее промежуточной балками.

В-шестых, максимальные напряжения выше статического предела текучести стали 09Г2С в два раза, но меньше динамического на 23 %. Но при расчетах не учитывались начальные прогибы элементов и наличие концентраторов напряжений.

В-седьмых, опрокидывание кузова полувагона глухого типа при падении в него груза массой 500 кг маловероятно, так как прогибы в шкворневых балках не более 5 мм, а зазор между скользунами рамы и тележки – 9 мм.

Итак, при падении груза массой 500 кг возникают большие напряжения, которые указывают на недостаточную способность рамы кузова полувагона глухого типа амортизировать удар без подсыпного слоя [81].

2.4 Выводы по разделу 2

Для исследования нагруженности кузова полувагона глухого типа была создана пространственная конечноэлементная пластинчато-стержневая модель, применение которой обоснованно верификацией – сопоставлением значений напряжений в ней и в плоской модели кузова.

Первичный анализ проведен расчетом кузова на ударную нагрузку с приведением его массы к точке удара и вычислением коэффициентов динамичности.

Получены высокие значения напряжений в эпицентре удара на участках продольной поддерживающей настил пола балке – до 768 МПа при статическом пределе текучести стали 345 МПа и динамическом – 1000 МПа [82].

Сход полувагона с кузовом глухого типа с тележек при погрузке в него 500 кг глыбы груза маловероятен.

Результаты расчетов указывают на необходимость дополнительных исследований прочности конструкций рамы кузова полувагона глухого типа выдерживать удар грузом массой 500 кг, падающего с высоты трех метров, без создания подсыпного слоя на раме.

3 УТОЧНЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ КУЗОВА ПОЛУВАГОНА ГЛУХОГО ТИПА ПРИ ПАДЕНИИ ГЛЫБЫ ГРУЗА

3.1 Определение метода расчета и граничных условий

Методика исследования заключается в динамическом неявном нелинейном динамическом решении контактной задачи падения груза на раму кузова полувагона глухого типа.

Алгоритм исследования состоит из следующих действий:

- 1) создания пластинчатой схемы МКЭ кузова полувагона;
- 2) создания контактной пары груз – рама;
- 3) определение начальных условий для решения динамических уравнений:
 - начальной скорости падения груза;
 - времени ударного воздействия падающей глыбы на балки рамы;
- 4) решение системы динамических уравнений движения;
- 5) определения зависимостей напряжений и перемещений;
- 6) формулировки выводов и составления рекомендаций.

Граничные условия уточненного исследования аналогичны принятым при первичных расчетах конечноэлементной модели кузова полувагона глухого типа:

1. Полувагон неподвижно стоит на железнодорожных путях.
2. Опираение кузова вагона на тележки выполнено в виде двух шарниров: подвижного и неподвижного. При этом не учитываются прогибы упругих элементов тележки после удара.
3. Подсыпной слой толщиной 300 мм из мелких фракций руды на раме кузова полувагона, предусмотренный ГОСТ 22235-2010 [1] для погрузки глыб массой 500 кг с высоты 3 м, не моделируется.
4. Сыпучие и аморфные свойства груза не учитываются.
5. Погрузочное устройство не придает глыбе дополнительное ускорение.

3.2 Обоснование пластинчатой пространственной схемы МКЭ кузова полувагона глухого типа

Конечноэлементная пластинчатая модель кузова полувагона глухого типа 12-1592, созданная в программном комплексе Siemens PLM Software NX, представлена на рисунке 3.1.

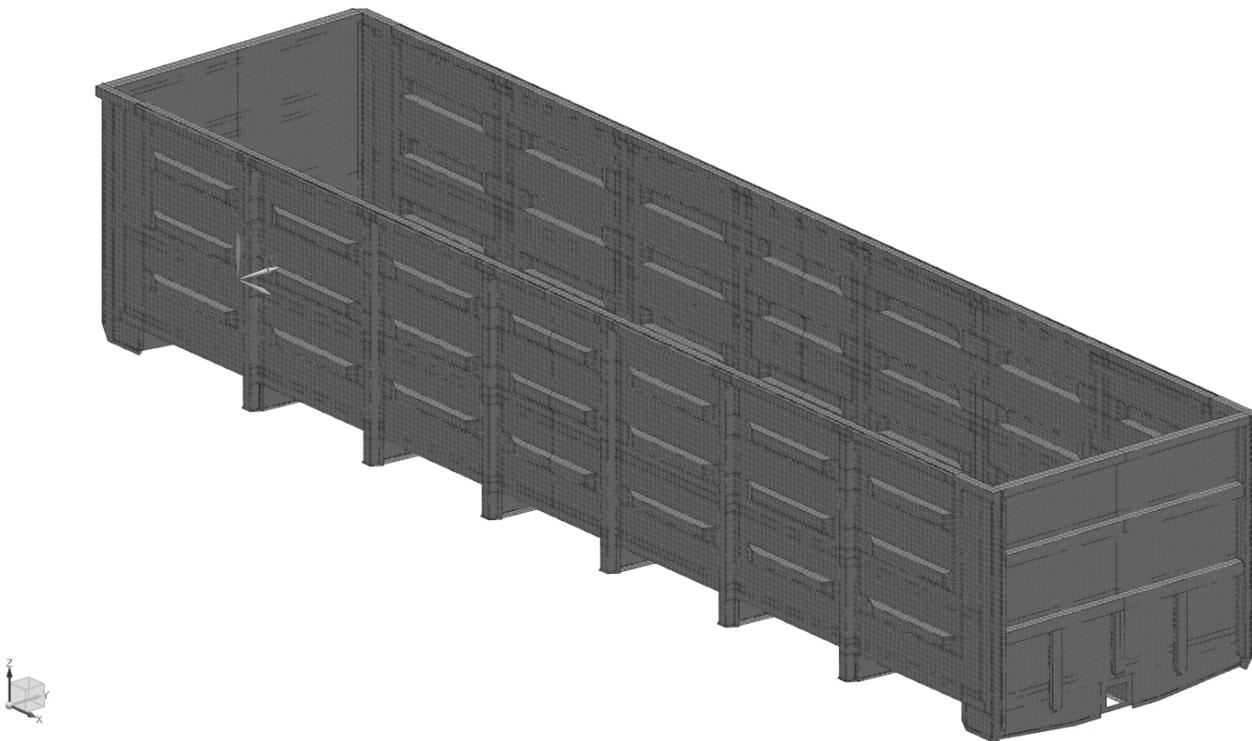


Рисунок 3.1 – Пластинчатая модель кузова полувагона глухого типа
При этом не моделировались элементы кузова полувагона.

В раме:

- система торможения и автостояночный тормоз: тормозные приборы и элементы воздушной магистрали, рычажная передача и детали их крепления;
- автосцепное оборудование, автосцепка и элементы их крепления;
- два люка в раме, предназначенные для слива конденсата, с деталями их крепления;
- подножки на лобовых балках и опоры под домкраты, расположенные на нижних листах шкворневых балок.

Особенности пространственной пластинчатой модели кузова полувагона глухого типа:

- 1) все детали кузова полувагона выполнены пластинчатыми конечными элементами;
- 2) при моделировании балок, гофров, стоек и т. д. применили упрощения поперечных сечений: убрали галтели и фаски и отверстия для крепления поручней, подножек и тормозного оборудования;
- 3) узлы соединений обвязок, стоек, балок, поясов и обшивки выполнены одной пластиной с суммарной толщиной, нейтральная плоскость которой одновременно касается всех образующих его деталей;
- 4) минимальные размеры пластин от 60 до 110 мм назначены исходя того, что нижняя полка уголка нижней обвязки торцевой и боковой стен выполнена двумя элементами.

Для проверки размеров элементов пластинчатой схемы МКЭ кузова полувагона глухого типа было проведено следующее исследование: пластину размером 600х600х5 мм, выполненную из конечных элементов с размерами 60х60 мм, нагрузили распределенной по всей площади силой равной 50 кН. Ее опирание выполнили шарнирным.

Расчеты пластины на прочности проводили аналитически, используя справочные материалы [83], подобной аналитический анализ прочности пластины проведен Бейном [4], и МКЭ, реализованным в программном комплексе Siemens PLM Software NX [84].

Расположение контрольных точек следующее – одна в центре, вторая – в верхнем правом углу, а третья – в нижнем левом, результаты исследований сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты исследования пластины, МПа

Точка	МКЭ	Расчет по методу сопромата	Погрешность, %
1	345	351	1,7
2	310	319	2,9
3	294	301	2,5

Таким образом, допустимо применять пластинчатую модель кузова полувагона глухого типа с размерами конечных элементов 60х60 мм для решения поставленных задач.

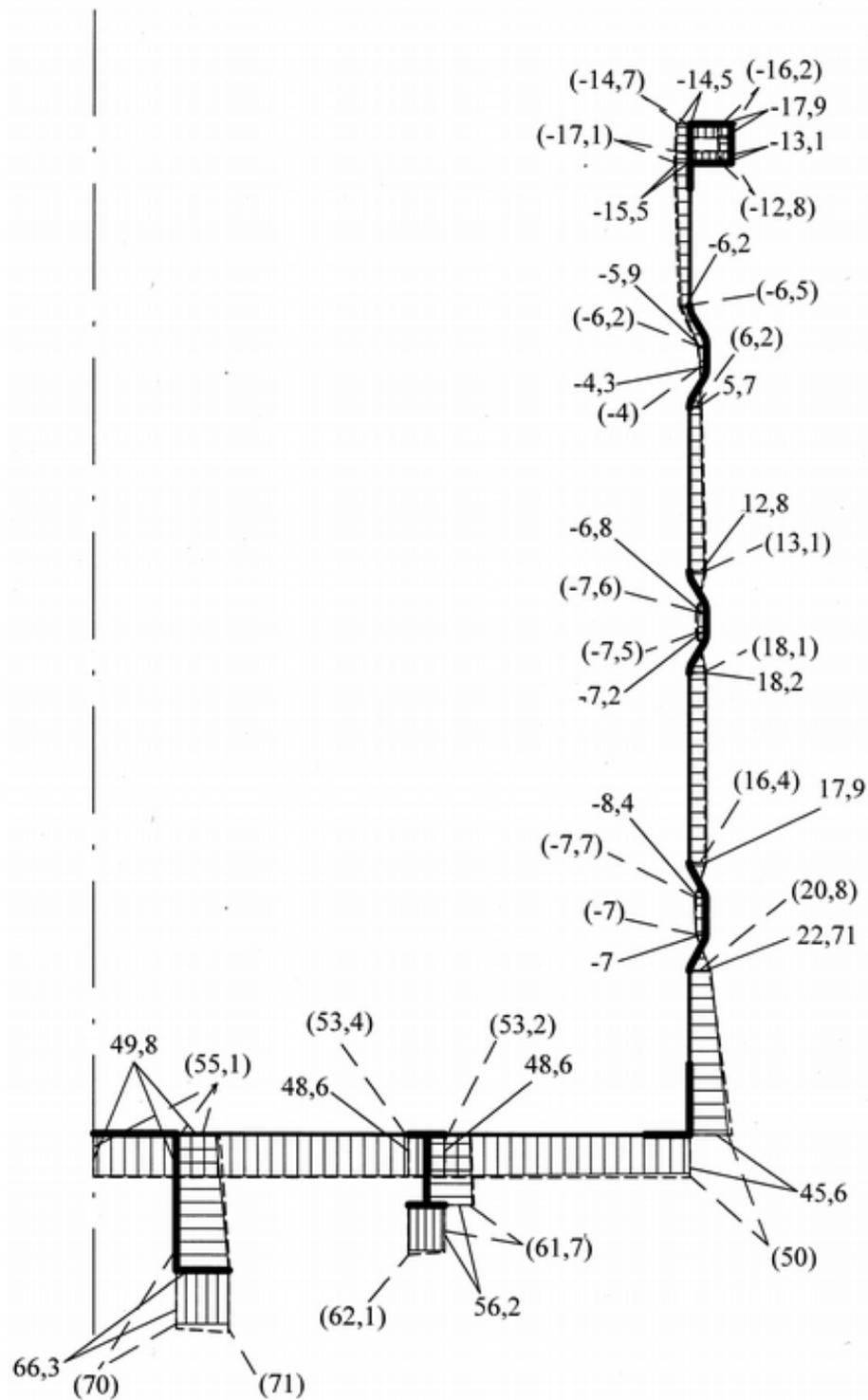
Физико-механические свойства конечных элементов можно задавать двумя способами. При первом способе свойства стали задаются модулем упругости и коэффициентом Пуассона, но при этом сужаются границы решаемых задачи в пользу повышения коэффициента запаса. (Он применен при первичном исследовании). Второй способ — построение диаграммы идеально упруго-пластического материала, или Прандтля [75].

В исследовании в качестве эталонных напряжений принят динамический, а не статический предел текучести стали, его значение для стали 09Г2С – 1000 МПа приведено в источнике [83]. В источниках [85, 86] утверждается, что модули упругости стали при статических и динамических испытаниях близки и для практических расчетов с достаточной достоверностью результата их можно принять равными.

3.3 Проверка пространственной пластинчатой схемы МКЭ кузова полувагона глухого типа

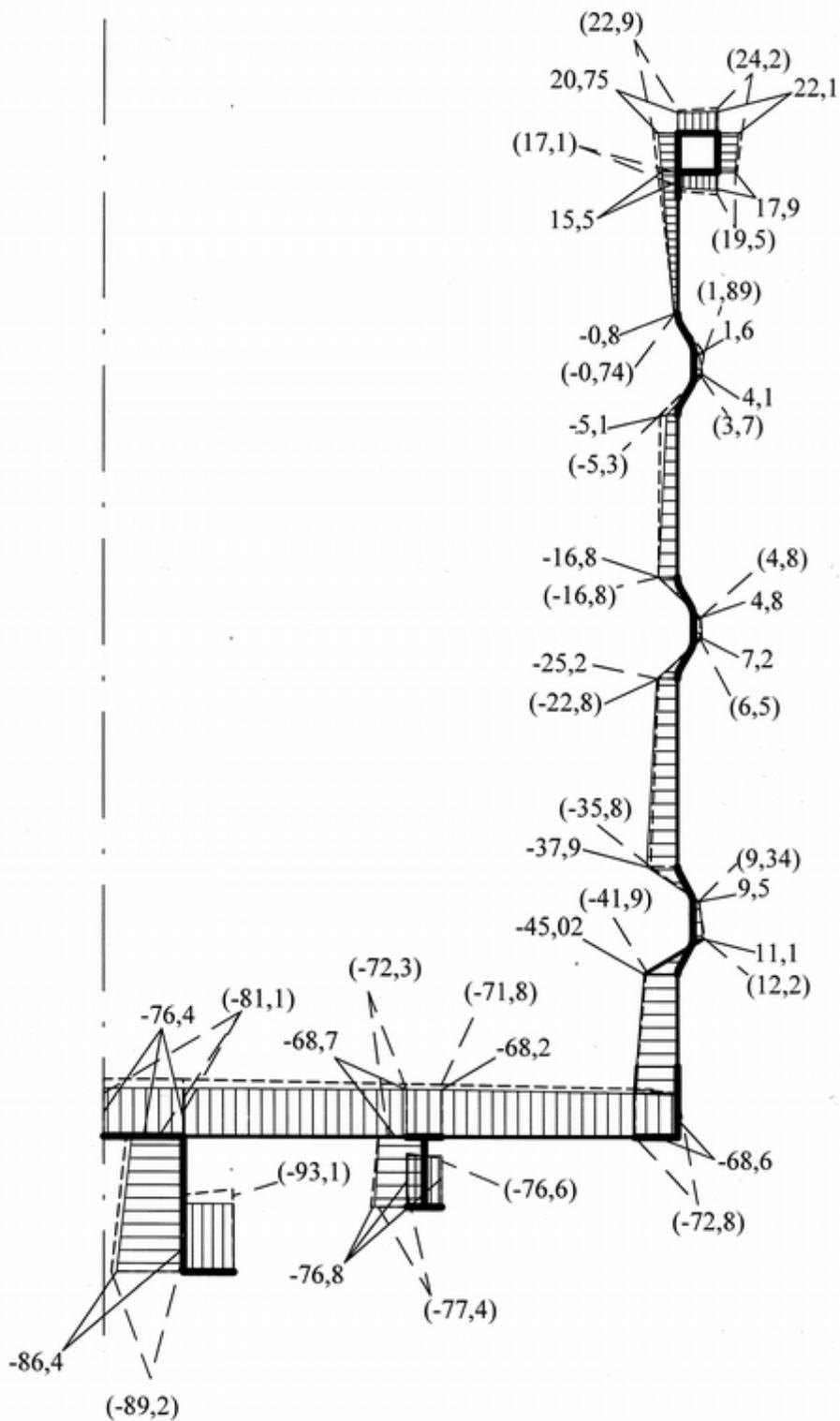
Для уточненного исследования проведем двухуровневую проверку. На первом уровне сопоставлены напряжения, возникающие при нагружении, соответствующем I и III расчетным режимам ГОСТ 33211–2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» [3], пластинчато-стержневой и пластинчатой моделей кузова полувагона, опирающихся на тележки, как балки на две опоры. На втором этапе сопоставлены полученные значения напряжений с результатами натурных испытаний.

Схемы приложения нагрузок и опирания моделей на грузовые тележки такие же, как и в первичном исследовании. Эпюры напряжений представлены на рисунках 3.2–3.7.



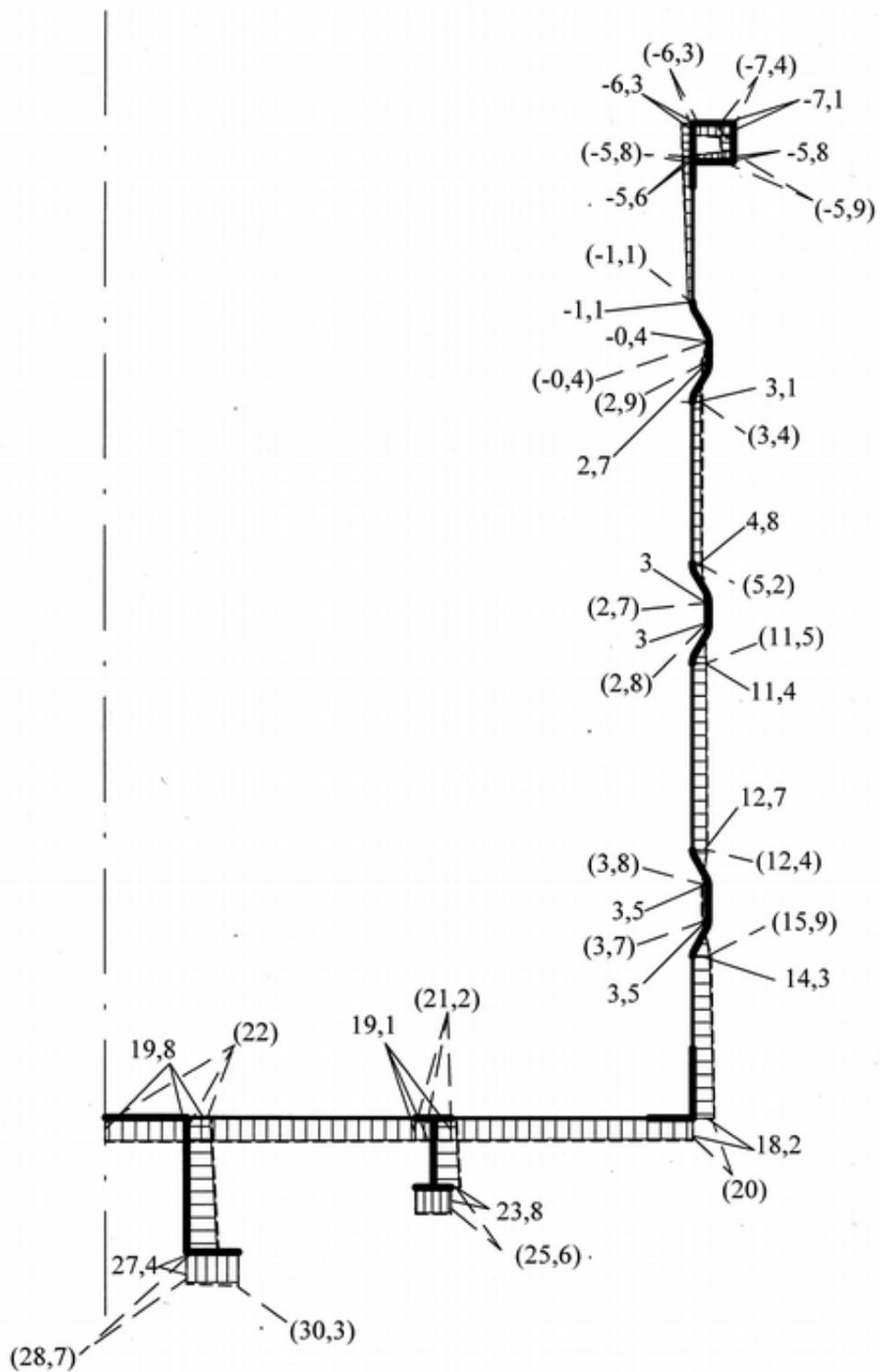
— в стержнево-пластинчатой модели; — и цифрами в скобках
 — для пластинчатой модели

Рисунок 3.2 – Эпюры нормальных напряжений в среднем сечении моделей кузова глухого типа при нагружении их растягивающей нагрузкой по I а расчетному режиму



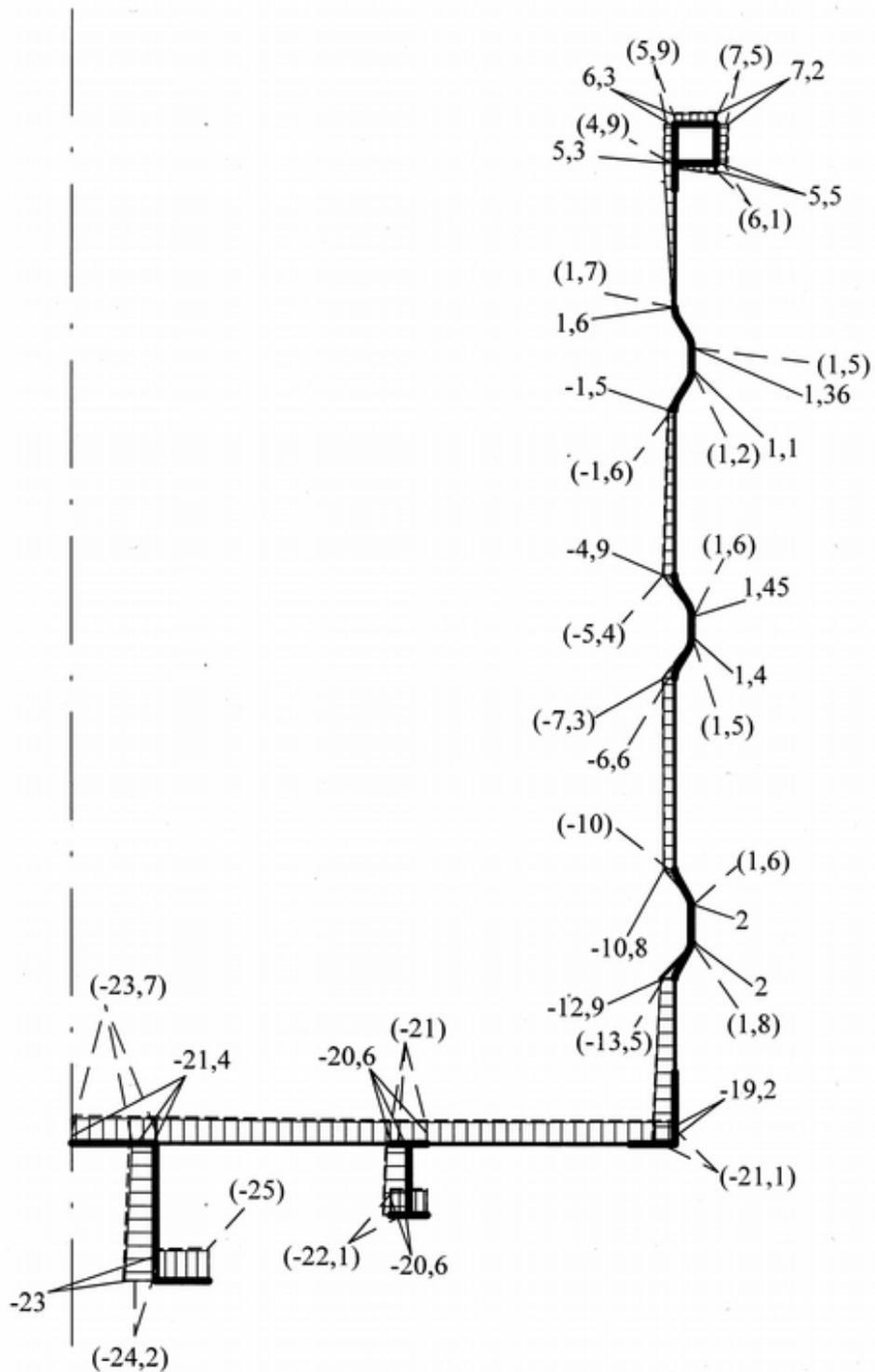
————— — в стержнево-пластинчатой модели; — и цифрами в скобках — для пластинчатой модели

Рисунок 3.3 – Эпюры нормальных напряжений в среднем сечении моделей кузова глухого типа при нагружении их сжимающей нагрузкой по I б расчетному режиму



————— — в стержнево-пластинчатой модели; — и цифрами в скобках — для пластинчатой модели

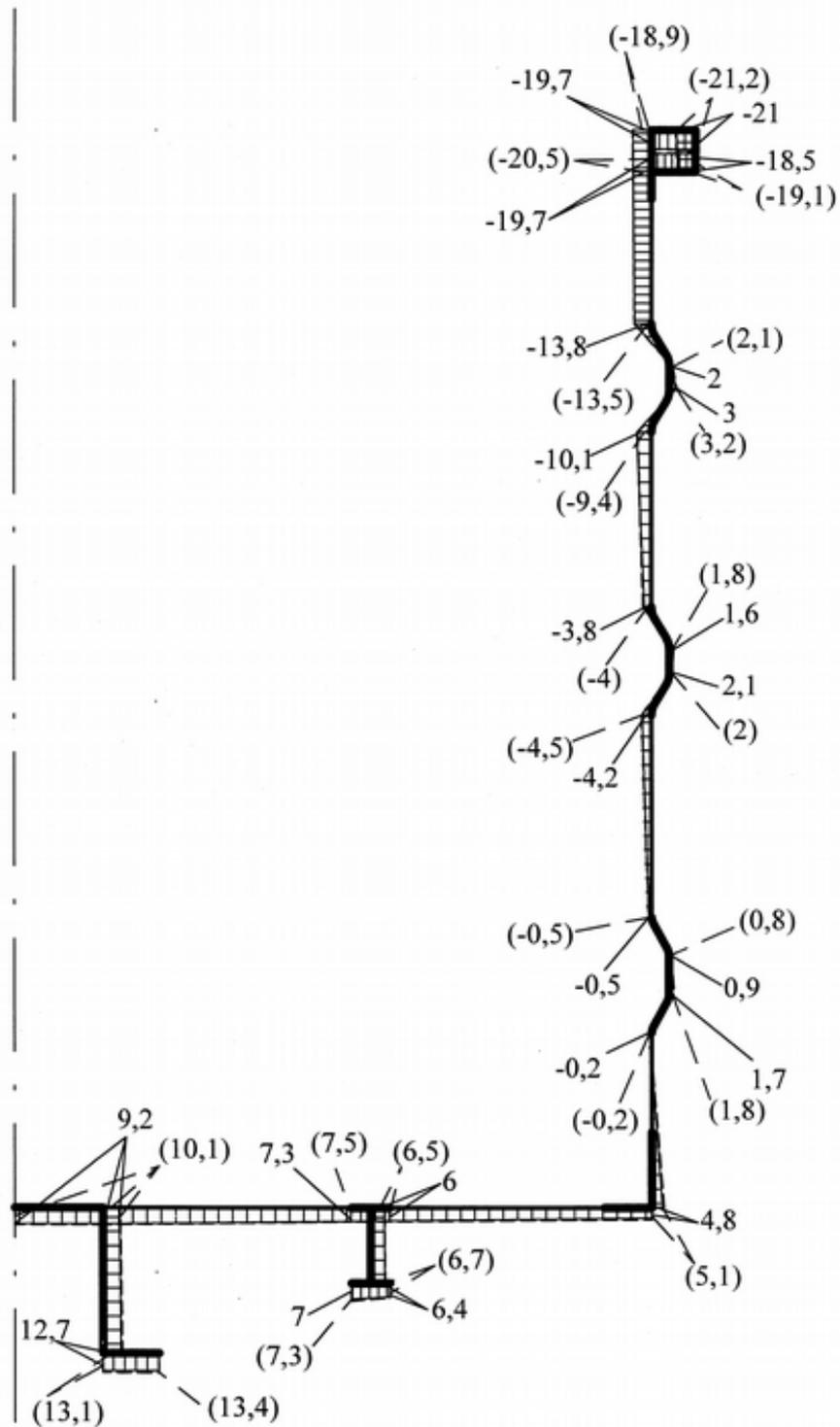
Рисунок 3.4 – Эпюры нормальных напряжений в среднем сечении моделей кузова глухого типа при нагружении их растягивающей нагрузкой по III а расчетному режиму



— в стержнево-пластинчатой модели; — и цифрами в скобках

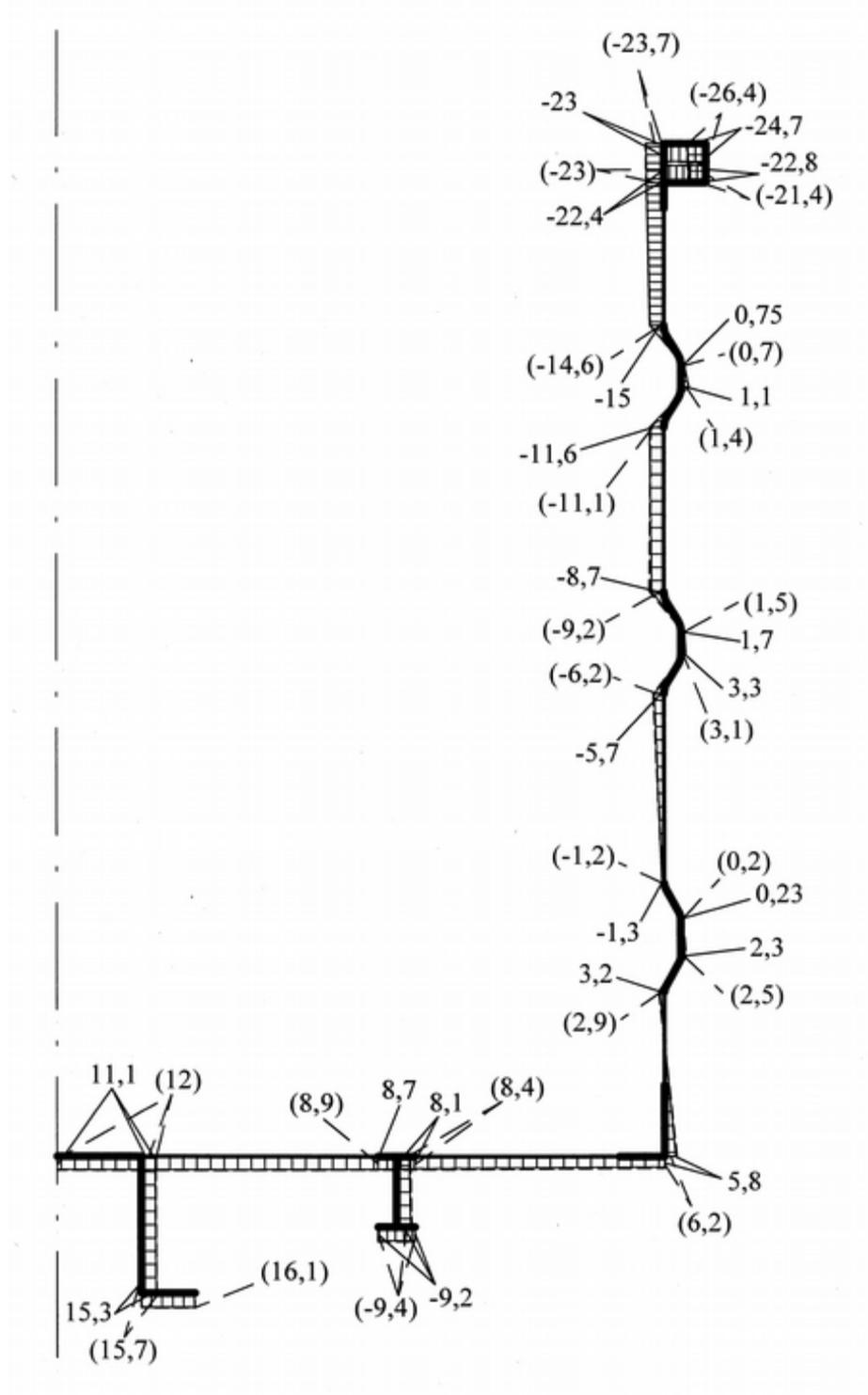
— для пластинчатой модели

Рисунок 3.5 – Эпюры нормальных напряжений в среднем сечении моделей кузова глухого типа при нагружении их сжимающей нагрузкой по III б расчетному режиму



_____ — в стержнево-пластинчатой модели; — и цифрами в скобках —
для пластинчатой модели

Рисунок 3.6 – Эпюры нормальных напряжений в среднем сечении моделей кузова глухого типа при нагружении их вертикальной нагрузкой по I расчетному режиму



_____ — в стержнево-пластинчатой модели МКЭ; — и цифрами в скобках — для пластинчатой модели

Рисунок 3.7 – Эпюры нормальных напряжений в среднем сечении моделей кузова глухого типа при нагружении их вертикальной нагрузкой по III расчетному режиму

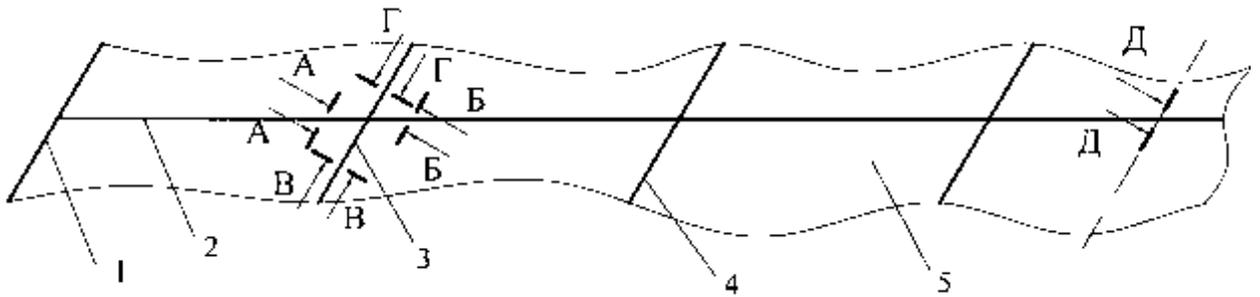
Расхождение значений напряжений в элементах, расположенных в среднем сечении пластинчато-стержневой и пластинчатой моделей МКЭ кузова, менее 10% и меньше в разы допускаемых [58], приведенных в таблице 2.3, что позволяет перейти ко второму уровню проверки моделей.

Целью второго уровня проверки является получение при сопоставлении результатов расчетов конечноэлементных пластинчато-стержневой и пластинчатой моделей с полученными при натурных испытаниях вагона-аналога расхождения значений напряжений до 13 %. Цифра 13 % состоит из погрешности работы измерительных датчиков и поправки, связанной с тем, что полувагоны имеют различия в несущих системах кузовов.

Если расхождение напряжений не превысит установленной границы, то можно будет утверждать, что данные, полученные с помощью пластинчато-стержневой и пластинчатой моделей кузова, имеют высокую степень достоверности для практики.

Для второго этапа проверки были запрошены и получены данные испытаний полувагона глухого типа из Тверского исследовательского центра. Это результаты статических испытаний полувагона модели 12-9833 Тихвинского вагоностроительного завода [88], конструкция стен которого имеет отличия от полувагона модели 12-1592. Рамы, сопоставляемых кузовов полувагонов, имеют одинаковую структурную схему и конструкцию балок [14, 60].

Приведем сопоставление значений напряжений, полученных в контрольных точках (рисунки 3.9, 3.10) сечений балок рамы (рисунок 3.8) при нагружении пластинчато – стержневой и пластинчатой моделей кузова полувагона нагрузками согласно I и III режимам «Норм....» [2] и ГОСТ 33211–2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» [3], с результатами натурных испытаний вагона.



1- коцевая балка, 2 - хребтовая балка, 3 - шкворневая балка, 4 - промежуточная балка, 5 - настил пола

Рисунок 3.8 – Схема расположения исследуемых сечений хребтовой и шкворневой балок

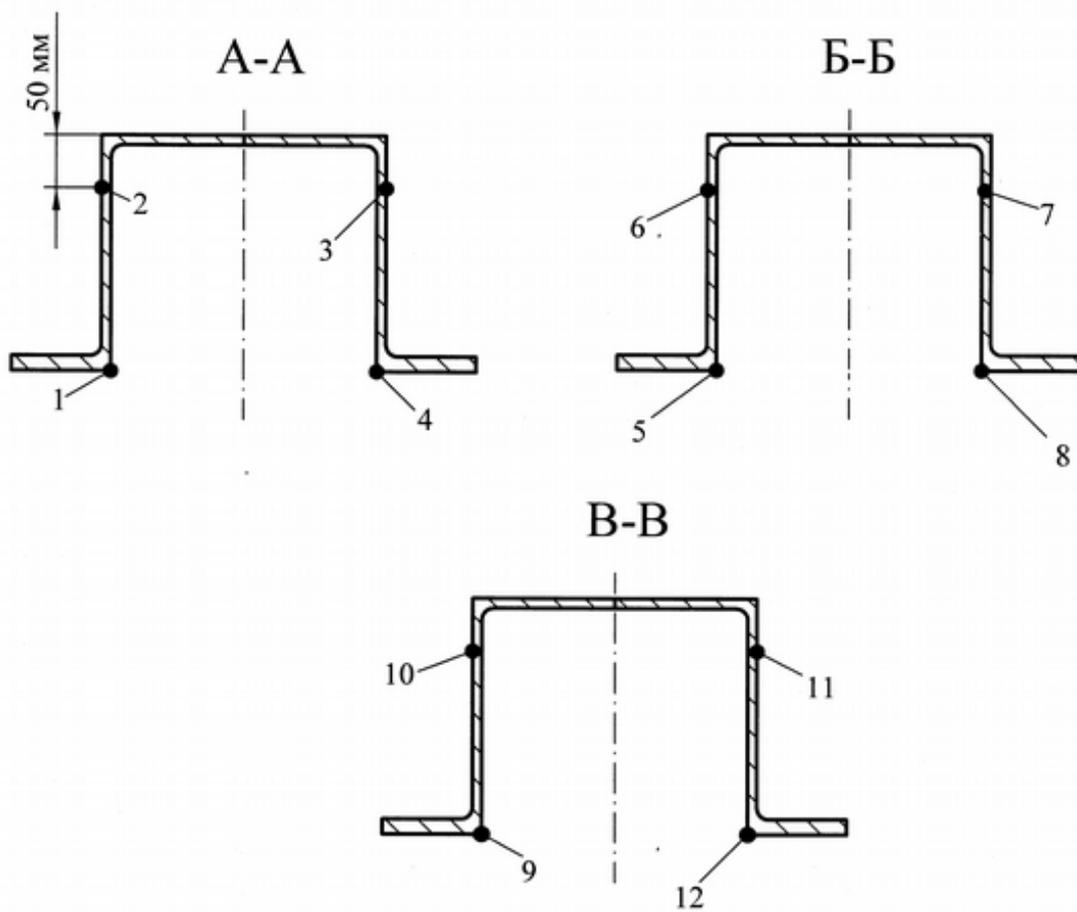


Рисунок 3.9 – Схема расположения контрольных точек на сечениях хребтовой балки рамы полувагона



Рисунок 3.10 – Схема расположения контрольных точек на сечениях шкворневой балки рамы полувагона

Значения напряжений, полученных при расчетах и испытаниях, сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.2 – Сопоставляемые напряжения, в МПа

Обозначение точки	Натурные испытания полувагона-аналога				Пластинчатая модель кузова полувагона глухого типа				Пластинчато-стержневая модель кузова полувагона глухого типа			
	сжатие		растяжение		сжатие		растяжение		сжатие		растяжение	
	1 МН	2,5 МН	1 МН	2 МН	1 МН	2,5 МН	1 МН	2 МН	1 МН	2,5 МН	1 МН	2 МН
1	-32	-83	32	64	-29	-87	36	60	-35	-80	40	57
2	-38	-84	29	60	-31	-90	31	65	-40	93	28	70
3	-29	-69	27	54	-25	-67	25	59	-31	-73	27	62
4	-28	-68	31	62	-32	-64	38	68	-27	-71	41	74
5	-31	-75	29	60	-29	-80	35	57	-30	-83	31	61
6	-30	-72	30	60	-34	-74	27	62	-38	-80	25	63
7	-29	-72	30	62	-31	-69	28	60	-32	-79	30	55
8	-26	-65	27	56	-28	-71	29	52	-24	-62	27	47

Обозначение точки	Натурные испытания полувагона-аналога				Пластинчатая модель кузова полувагона глухого типа				Пластинчато-стержневая модель кузова полувагона глухого типа			
	сжатие		растяжение		сжатие		растяжение		сжатие		растяжение	
	1 МН	2,5 МН	1 МН	2 МН	1 МН	2,5 МН	1 МН	2 МН	1 МН	2,5 МН	1 МН	2 МН
9	-29	-76	29	59	-25	-71	30,3	60	-23	-72	27,4	57
10	-25	-67	27	54	-24,2	-57	28,7	53	-21,4	-50	19,8	48,2
11	-28	-72	27	55	-23,7	-55,1	22	51	-21,4	-50	19,8	48,2
12	-33	-83	31	64	-25	-70	30,3	58	-23	-72	27,4	57
13	24	59	-27	-54	25	55	-32	-58	27	63	-28	-51
14	9	23	-15	-32	12	24	-20	-40	6	29	-22	-42
15	-8	-16	12	24	-11	-20	15	27	-13	-17	13	25
16	-1	2	5	11	-3	5	8	13	-5	2	5	8
17	12	25	-15	-32	15	30	-13	-35	13	32	-9	-27
18	32	73	-32	-66	28	65	-34	-70	26	71	-37	-64
19	0	1	7	15	-2	0	10	17	-2	0	9	15
20	-10	-17	12	25	-12	-22	11	28	-9	-20	7	22

Из приведенных в таблице 3.1 результатов видно, что расхождение напряжений не превосходит 12%, за исключением нескольких значений, которые можно отнести к погрешности вычислений ввиду их малочисленности. Полученные напряжения меньше допусковых напряжений, приведенных в таблице 2.3. Обе модели кузова прошли проверку.

3.4 Результаты расчетов и выводы

При расчетах груз моделируется сферой с радиусом 600 мм, полученным для глыбы массой 500 кг с удельной плотностью 1,2 кг/м³ [89].

При уточненном исследовании процесса падения груза на раму применим расширенный нелинейный динамический неявный анализ ADVNL SOL 601, 129 для решения контактной задачи, описанный в пособии [84].

Таким образом при решении контактной задачи, проникновение падающего груза определяется по следующему выражению:

$$p = p_0 \cdot (u_n - u_t) \cdot n, \quad (3.1)$$

где p_0 — начальное проникновение груза в балку в произвольной точке;

u_n — перемещение груза;

u_t — перемещение балки, на которую упал груз;

n — нормаль к поверхности балки, на которую падает груз.

Условие контакта представляет собой следующую зависимость [84]:

$$t_n \cdot p = 0, \quad (3.2)$$

при $t_n > 0$ — контактное давление;

$p < 0$ — нулевое взаимодействие.

Динамическое уравнение для системы кузов полувагона глухого типа — глыба груза, описывается следующим уравнением представленным в матричной форме [84]:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}(t)\} + [B] \cdot \{\dot{u}(t)\} + [K] \cdot \{u(t)\} = \{P(t)\} + \{N(t)\} + \{N(t - \Delta t)\}, \quad (3.3)$$

где $[M]$ — глобальная матрица массы кузова полувагона глухого типа;

$[B]$ — глобальная матрица рассеивания энергии (демпфирование);

$[K]$ — глобальная матрица жесткости;

$\{P\}$ — внешние силы;

$\{N\}$ — дополнительная сила, учитывающая все нелинейности контакта, свойств стали 09Г2С;

\ddot{u} , \dot{u} , u — ускорение, скорость, перемещение соответственно.

В источнике [84] говорится о том что при кратковременных динамических (ударных нагрузках) демпфирование В можно не учитывать, так как «максимальный отклик конструкции наблюдается прежде, чем начинается процесс диссипации».

Уравнение движения (3.3) примет вид:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}(t)\} + [K] \cdot \{u(t)\} = \{P(t)\} + \{N(t)\} + \{N(t - \Delta t)\}, \quad (3.4)$$

Матрица массы задается плотностью материала векторами формы и объемом тела и остается постоянной по времени, а матрица жесткости пересчитывается при каждой итерации.

Более подробно формирование матриц приведено в пособиях [77, 84].

Решения динамического уравнения выполняется методом Ньютона-Рафсона, при интегрирование по времени по методу Ньюмарка [84].

Критерии пластичности были приняты, разработанные Рихардом фон Мизесом [84].

После выгрузки глыбы груза из ковша погрузочного устройства, она летит вниз со скоростью, которую можно оценить, применив формулы, описывающие равноускоренное падение тела [90].

В начале отрыва от ковша скорость падения груза равна нулю.

$$v = \sqrt{2gh}, \quad (3.5)$$

где g - ускорение свободного падения; h - высота падения груза.

Значение скорости падения с трехметровой высоты одинаково для всех экспериментов и на подлёте к балкам рамы составит 7,67 м/с.

Второй важной величиной является время удара - это промежуток времени, состоящий из отрезка времени от отрыва груза от ковша погрузочного устройства до контакта с рамой полувагона и временем его ударного воздействия на балку.

Время падения глыбы смерзшегося груза определим по формуле из учебника [90]:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}, \quad (3.6)$$

где g - ускорение свободного падения; h - высота падения груза.

Время свободного падения груза одинаково для всех расчетов и равно 0,74 с.

Определение времени ударного взаимодействия – трудная задача. Это период времени от начала касания выступающей части груза поверхности рамы до окончания его давления на балку.

В настоящее время существует несколько способов оценки времени контакта. Первый – экспериментальный с применением сложной аппаратуры и второй – аналитический.

В исследовании остановимся на втором способе, который базируется на зависимости [91]:

$$t = \frac{2L}{v}, \quad (3.7)$$

где v - скорость звука в стали;

L - характерный размер одного из тел, участвующих в ударном процессе, цифра 2 означает прямое и обратное направление распространения ударной волны.

Скорость распространения звука в стали равна 5930 м/с [92].

Характерные размеры для каждого эксперимента назначались индивидуально, в зависимости от расположения в кузове полувагона эпицентра удара. При этом учитывалось, что:

1) силовые потоки в несущей системе кузова полувагона сходятся в двух шкворневых узлах, через которые передаются на рельсы, поэтому важно учитывать удалённость эпицентра удара от пятников и скользунов;

2) при ударе большая часть энергии передается балке;

3) поперечные балки жестко соединены с хребтовой балкой, опирающейся на тележки и имеющей мощное поперечное сечение, поэтому наибольший путь, который проходит ударная волна, сопоставим с длиной базы вагона;

4) продольная поддерживающая балка имеет небольшую площадь поперечного сечения и состоит из частей, приваренных к поперечным балкам рамы;

5) при проведении расчетов падения грузов на участки продольной поддерживающей настил пола балки длина пути ударной волны в двух направлениях принята равной внутренней длине кузова полувагона исходя из

того, что между скользунами тележки и кузова нет непосредственного контакта, как у пятника шкворневой и подпятника надрессорной балки грузовой тележки.

Для поставленных целей достаточно провести расчеты падения глыбы на несколько балок: шкворневую, первую от нее промежуточную, середину хребтовой балки и два участка продольной поддерживающей балки – между шкворневой и первой, второй и третьей от нее промежуточными балками.

При уточненных расчетах получены следующие картины напряженно-деформированного состояния кузова полувагона глухого типа.

При ударе середины хребтовой балки напряжения достигают максимальных значений – 45 МПа (при времени ударного воздействия 0,00125 с) (рисунок 3.11), во второй и третьей промежуточных балках – 32 МПа, а в остальных элементах несущей системы близки к нулю.

Наблюдается проседание середины рамы вниз при неподвижных консолях.

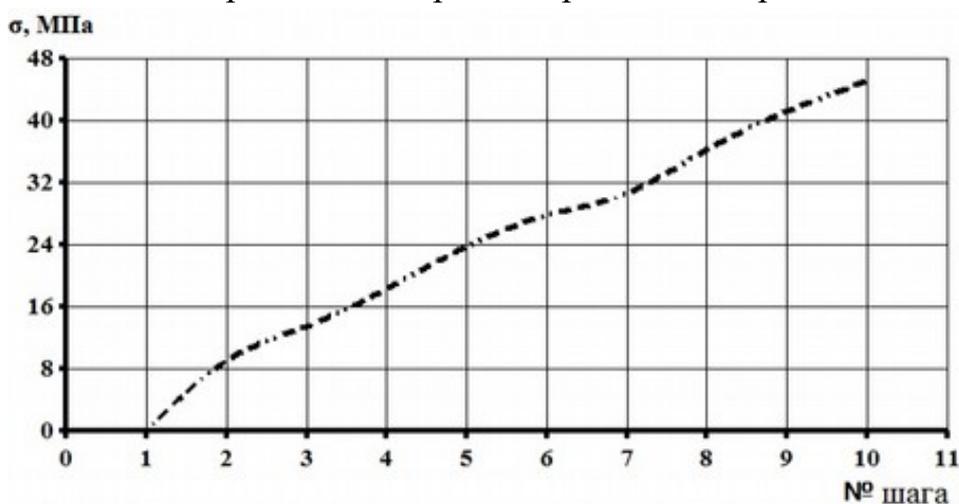


Рисунок 3.11 – График напряжений в эпицентре удара при падении глыбы груза на середину хребтовой балки

Для проведения исследования период временем ударного воздействия глыбы груза на балку распределен по десяти шагам.

При исследовании падения груза на участок продольной поддерживающей балки, расположенный между второй и третьей промежуточными: время ударного взаимодействия приняли 0,002 с, напряжения в области удара достигли 193 МПа [89]. Данная величина меньше полученной при первичных расчетах – 292 МПа. Но в исследовании [4], в котором учитывались прогибы тележек, получено напряжение 280 МПа. Поэтому, так как в двух разных источниках получены

близкие результаты и в источнике [91], в котором приведена формула (3.7) указывается на ограниченность ее применения, то допустимо время ударного воздействия корректировать, прежде всего для расчетов ударов по участкам продольной поддерживающей настил пола балки.

Таким образом после корректировки период времени ударного воздействия составил 0,00287 с максимальные напряжения в продольной поддерживающей настил пола балке, расположенной между второй и третьей промежуточными балками достигли 271 МПа, при ударе ее грузом (рисунок 3.12); во второй промежуточной балке – 158 МПа, в третьей – 115 МПа; в близлежащей к удару нижней обвязке – 205 МПа; в хребтовой балке – 96 МПа; в остальных элементах рамы не превышают 80 МПа.

При ударе середина вагона поворачивается относительно своей продольной оси, а ударяемая часть кузова проседает вниз при неподвижных консольных частях.

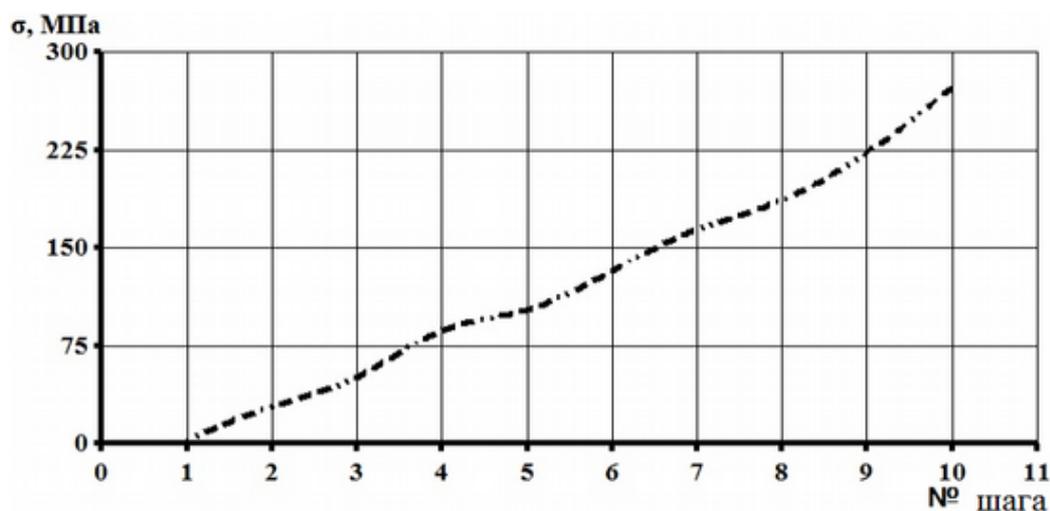


Рисунок 3.12 – График напряжений в эпицентре удара при падении глыбы груза на участок продольной поддерживающей настил пола балки, расположенный между второй и третьей от шкворневой промежуточными балками

При ударе шкворневой балки в эпицентре напряжения составляют 21 МПа при времени ударного воздействия 0,00095 с (рисунок 3.13); в первой промежуточной балке – 15 МПа; в узле соединения ударяемой нижней обвязки со шкворневой балкой – 27 МПа, а в остальных узлах кузова – менее 20 МПа.

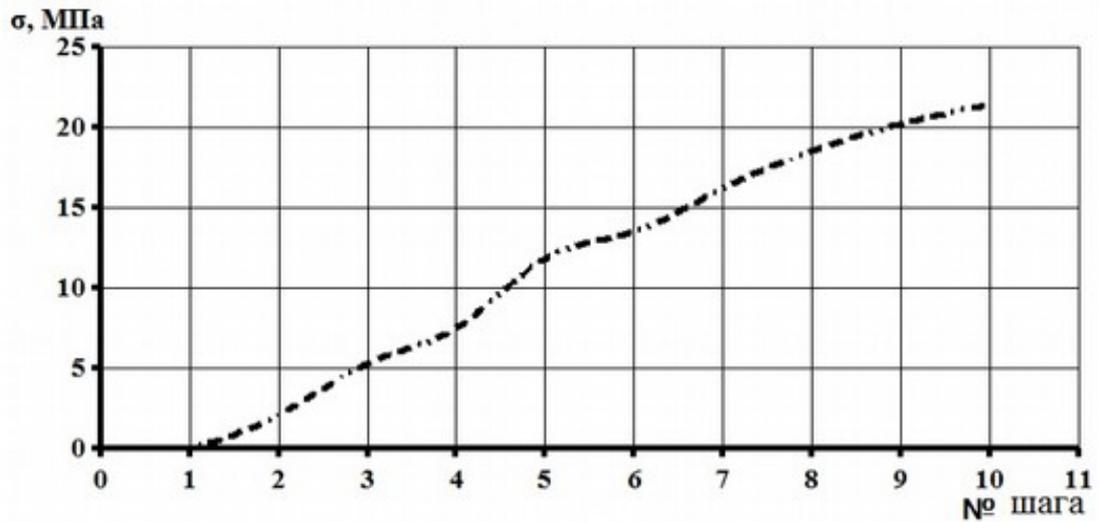


Рисунок 3.13 – График напряжений в эпицентре удара при падении глыбы груза на шкворневую балку

При ударе глыбой в первую промежуточную балку в ней возникают напряжения 68 МПа при периоде времени удара 0,00162 с (рисунок 3.14).

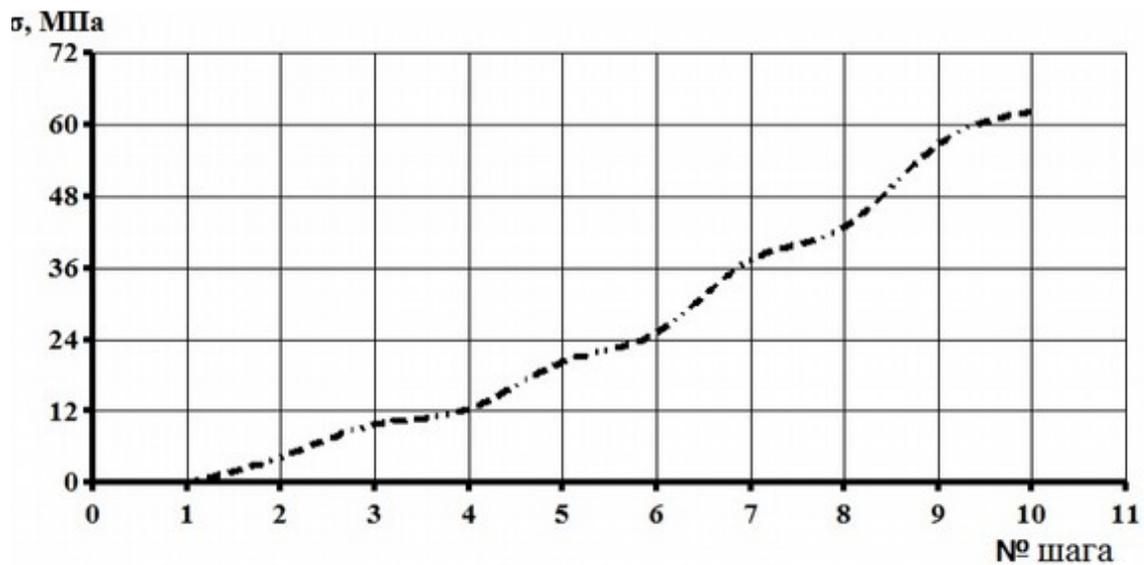


Рисунок 3.14 – График напряжений в эпицентре удара при падении глыбы груза на первую от шкворневой промежуточную балку

При ударном воздействии груза на продольную балку, расположенную между шкворневой и ближайшей от нее промежуточной балками, максимальные напряжения составили: в месте приложения нагрузки – 623 МПа (рисунок 3.15); в середине шкворневой балки, вблизи установки скользуна, ближайшего к эпицентру удара – 187 МПа; на участке продольной поддерживающей балки между первой и второй промежуточными – 156 МПа; в первой от шкворневой промежуточ-

ной – 289 МПа; а во второй – 109 МПа; в ударяемой нижней обвязке между шкворневой и промежуточной балками – 265 МПа, в неударяемой обвязке – 56 МПа при изгибе вниз частей шкворневой и двух промежуточных балок, близких к области удара.

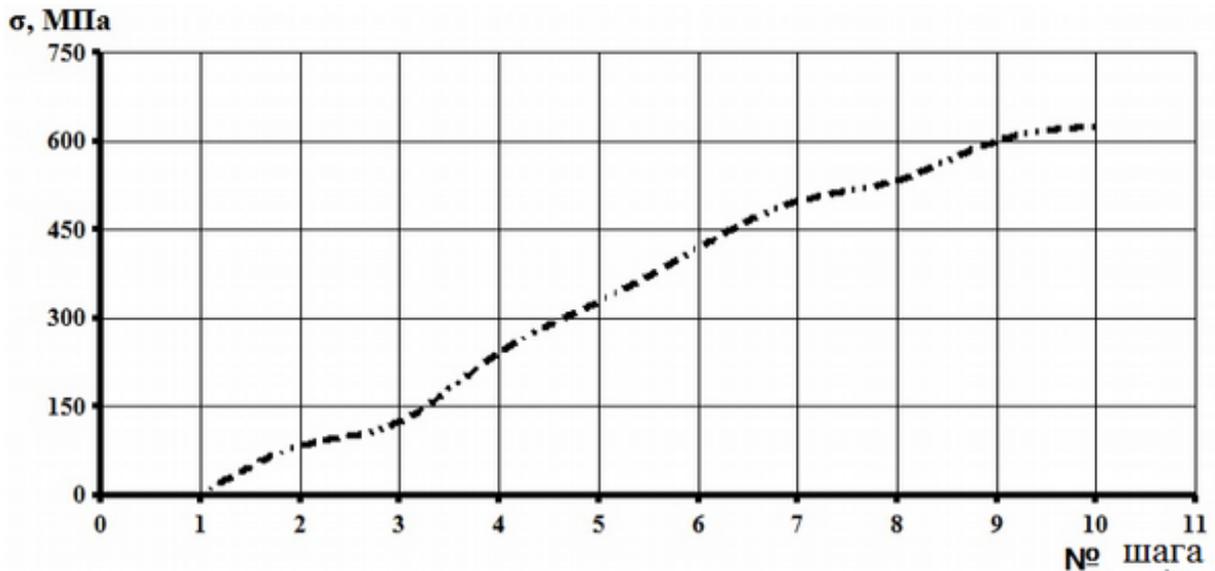


Рисунок 3.15 – График напряжений в эпицентре удара при падении глыбы груза на участок продольной поддерживающей настил пола балки, расположенный между шкворневой и первой от шкворневой промежуточной балками

В ходе исследования были выявлены следующие особенности картины напряженно-деформированного состояния полувагона с кузовом глухого типа.

1 Расхождения напряжений в эпицентрах ударов элементов кузова, полученные при первичном и уточненном исследованиях, не превышают 10% и сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Напряжения в эпицентре удара, МПа

Наименование балки	Первичный расчет	Уточненный расчет
Шкворневая	25	21
Продольная поддерживающая, расположенная между шкворневой и первой от нее промежуточной	658	623
Первая от шкворневой промежуточная	65	68

Наименование балки	Первичный расчет	Уточненный расчет
Продольная поддерживающая, расположенная между второй и третьей от шкворневой промежуточными	292	271
Середина хребтовой	48	45

2 Уточненный расчет показал, что в поддерживающих продольных балках рамы высокие напряжения, которые необходимо снизить, так как они повышают уровень нагруженности кузова полувагона глухого типа.

3.5 Выводы по разделу 3

Таким образом, расчеты, проведенные при первичных исследованиях опираются на более простые аналитические зависимости, чем расчеты при уточненных, но дают напряжения выше на 10% (таблица 3.3).

Уточненный расчет подтвердил, что наиболее нагруженными элементами рамы кузова полувагона являются продольные поддерживающие настил пола балки.

Полученные напряжения в эпицентре удара велики по сравнению с динамическим и статическим пределами текучести стали 09Г2С и необходимо принять меры, направленные на усиление узла подкрепления настила пола рамы кузова полувагона глухого типа.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НЕСУЩИХ СИСТЕМ КУЗОВОВ ПОЛУВАГОНОВ ПРИ ПАДЕНИИ В НИХ ГЛЫБ ГРУЗА

Общий алгоритм исследования двух типов несущих систем кузовов полувагонов с разгрузочными люками в раме и без них аналогичен первичному расчету полувагона глухого типа и включает следующие действия:

- 1) создание пространственной схемы МКЭ (для полувагона с разгрузочными люками);
- 2) задание граничных условий;
- 3) расчета кузовов на ударную нагрузку с приведением массы кузова к точке удара и вычислением коэффициента динамичности и с их помощью динамических напряжений и перемещений;
- 4) составление зависимостей напряжений и перемещений и их анализ;
- 5) формулировка выводов и рекомендаций.

Таким образом, произведен расчет кузовов полувагонов с различными типами несущих систем на ударную нагрузку с приведением массы кузова к точке удара и вычислением коэффициента динамичности, рассчитанного по зависимости (2.11), определены значения динамических напряжений по формуле (2.12) и проведен анализ полученных результатов, в соответствии с требованиями прочности к элементам рамы аналитического выражения (2.13).

Для исследования кузовов полувагонов с разгрузочными люками в раме и глухого типа граничные условия примем такие, как и для первичных расчетов, за исключением способа приложения ударной нагрузки падающего груза. Рассмотрим вариант приложения нагрузки глыбы весом 500 кг к одному узлу, тем самым моделируя гипотетическую ситуацию, при которой у глыбы груза есть выступ, который попадает на балку рамы вагона.

4.1 Обоснование пластинчато-стержневых пространственных схем МКЭ кузовов полувагонов

Для анализа напряженно-деформированного состояния кузова полувагона глухого типа воспользуемся конечноэлементной моделью, созданной и прошедшей проверку при первичных расчетах.

Для исследования нагруженности несущей системы кузова полувагона с разгрузочными люками при ударе глыбой в качестве объекта исследования примем вагон модели 12-783, который изготавливали несколько предприятий стран СНГ. Изображения полувагона модели 12-783 приведены на рисунках 4.1 [<http://scale-trainsclub.com/board/viewtopic.php?f=46&t=3960&start=30>, дата обращения 12.02.2016] и 4.2 [http://zaotgk.ru/catalog/Universalnie_vagoni/Poluvagon_12_783, дата обращения 12.02.2016].



Рисунок 4.1 – Полувагон модели 12-783

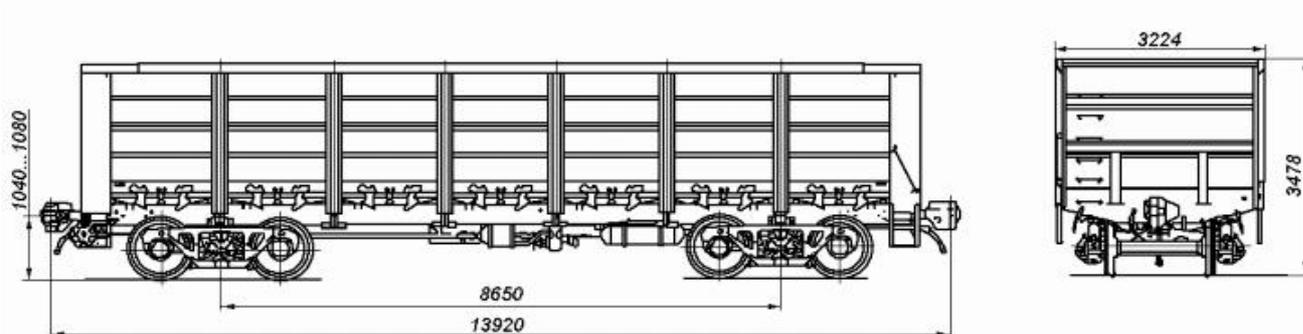


Рисунок 4.2 – Габаритные размеры полувагона 12-783

Четырёхосный цельнометаллический полувагон предназначен для перевозки массовых неагрессивных, насыпных, навалочных грузов [93].

Полувагон состоит из кузова, ходовых частей, тормозной системы и автоцепки.

Кузов состоит из рамы, боковых и торцевых стен.

В состав рамы входят хребтовая балка, состоящая из зетовых профилей № 31 и двутавра № 19, сварные шкворневые, концевые, промежуточные балки и четырнадцать разгрузочных люков.

Боковая стена – каркас из верхней и нижней обвязок, шести промежуточных стоек и двух угловых полос, перекрытый двумя листами обшивки с постоянными гофрами.

Торцовая стена состоит из двух обвязок - верхней и нижней, угловых стоек, полустоек, поясов жесткости и листов без гофров.

Элементы несущей системы выполнены из стали марок 09Г2Д, 09Г2С и 10ХНДП [93].

Вагон оборудован автоматическим и ручным стояночным тормозами, автоцепкой СА-3 и ходовой частью – двумя грузовыми тележками модели 18 - 100.

Техническая характеристика полувагона модели 12-783 представлена в таблице 4.1 [93].

Таблица 4.1 – Техническая характеристика полувагона модели 12-783

Показатели	Значения
Грузоподъемность, т	70
Тара, т	23,5±0,5
Объем кузова, м ³	78±0,5
База вагона, мм	8650
Длина, мм: по осям сцепления автосцепок по концевым балкам рамы кузова внутри	13920–128000 12228
Ширина, мм: максимальная, кузова внутри	3230 2964
Высота, мм: от уровня головок рельсов кузова внутри	3486 2045
Нагрузка от колесной пары на рельсы, тс	23,05
Количество разгрузочных люков, шт.	14
Площадь пола, м ²	36,63
Угол открывания средних крышек люков, °	31
Угол открывания крышек люков над тележками, °	23,5
Размер разгрузочных люков в свету, мм	1370x1540
Конструкционная скорость, км/ч	120
Габарит по ГОСТ 9238-2013	1-ВМ
Высота автосцепки от уровня головки рельса, мм	1040...1080

Модель кузова полувагона с разгрузочными люками 12-783, созданная в программном комплексе Siemens PLM Femap, представлена на рисунке 4.3.

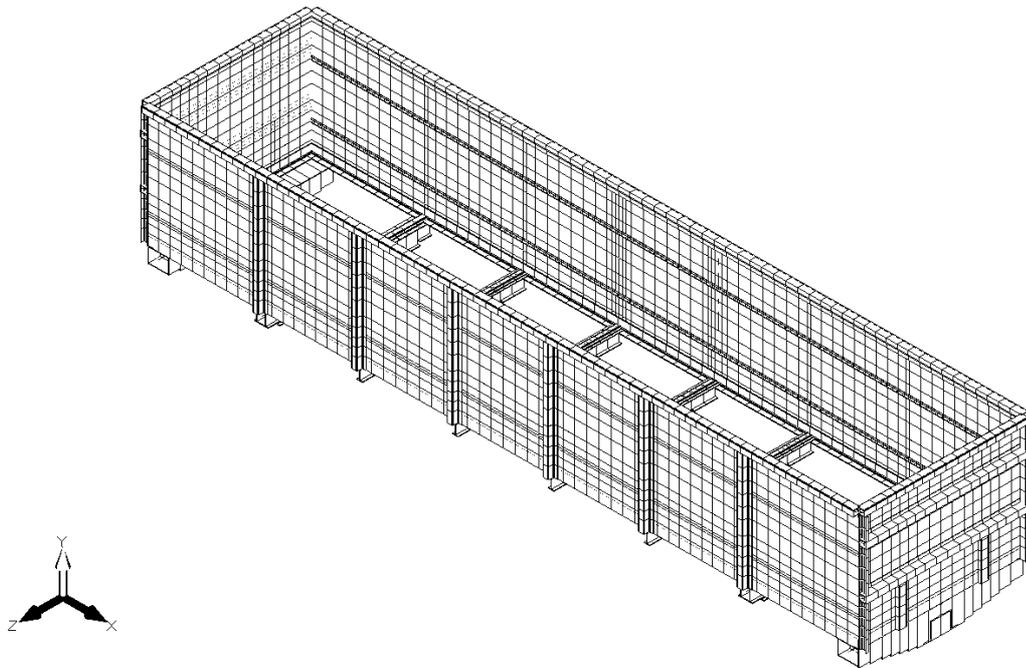


Рисунок 4.3 – Пластинчато-стержневая модель кузова полувагона с разгрузочными люками в раме

При этом не моделируются следующие элементы кузова полувагона.

В раме:

- система торможения и автостояночный тормоз: тормозные приборы и элементы воздушной магистрали, рычажная передача и детали их крепления;
- автосцепное оборудование, автосцепка и элементы их крепления;
- разгрузочные люки в раме;
- подножки на концевых балках и опоры под домкраты, расположенные на нижних листах шкворневых балок.

Отсутствие разгрузочных люков объясняется:

- они не являются элементами основной несущей системы вагона и служат для формирования полезного объема кузова и воспринимают нагрузку сыпучего груза, передавая ее воздействие через крепления на двутавр хребтовой балки и нижнюю обвязку боковой стены;
- их исследования приведены в работах [43, 44].

В боковых и торцевых стенах не моделируются увязочные кольца и кронштейны для крепления грузов, а также наружные и внутренние лестницы, поручни и элементы их крепления.

Также не моделируются сварочные, резьбовые и клепанные соединения; детали усиления узлов соединения между собой балок и стоек для компенсации силовых воздействий от эксплуатационных нагрузок.

Пластинчато-стержневая модель полувагона с разгрузочными люками выполнена из следующих элементов: линейных (одномерных) beam (элементов с постоянными по высоте поперечными сечениями) и tapered beam (элементы с переменными высоте поперечными сечениями), работающих на изгиб, растяжение и сжатие; плоские (двухмерные) plate [77].

Пластинчато-стержневая модель кузова полувагона с разгрузочными люками в раме имеет следующие особенности:

1) поперечные балки рамы смоделированы в виде 16 стержней с поперечными сечениями разной высоты (tapered beam): максимальной – в узле соединения с хребтовой балкой и минимальной – в узле соединения с нижней обвязкой;

2) шкворневой узел упрощен: скользуны и надпятник учтены за счет увеличения геометрических характеристик его нижнего листа;

3) упрощен узел соединения верхних обвязок торцевых и боковых стен полувагона за счет увеличения геометрических характеристик соединяемых участков;

4) элементы кузова полувагона (beam), моделирующие стойки, пояса жесткости, обвязки, гофры соединены абсолютно жесткими связями, при этом учитывается эксцентриситет элементов балочного типа относительно пластин, моделирующих обшивку стен;

5) обшивка боковых и торцевых стен выполнена прямоугольными пластинчатыми элементами (plate) шириной 102–150 мм и длиной 85–235 мм;

6) всего стержневых элементов в модели 882, пластинчатых – 1520, она имеет $1,44 \cdot 10^4$ степеней свободы;

7) для расчетов всем элементам модели заданы изотропные свойства стали 09Г2С с модулем упругости $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа и коэффициентом Пуассона 0,3, а в качестве эталонных значений напряжений принят динамический предел текучести, равный 1000 МПа [82].

Для проверки приемлемости разбивки конечных элементов модели кузова провели тестовые расчеты участка хребтовой балки длиной 1,71 м, разбитого на 8 частей, состоящего из двух № 31 и опирающегося на подвижный и неподвижный шарниры, приложив к его середине нагрузку 100 кН, аналитическим методом [75] и МКЭ, реализованном в программном комплексе Siemens PLM Femap.

Максимальные напряжения вычислены по формуле (2.17)[75]:

Результаты расчетов напряжений в точках 1 – 3 (рисунок 4.4) сведены в таблицу 4.2.

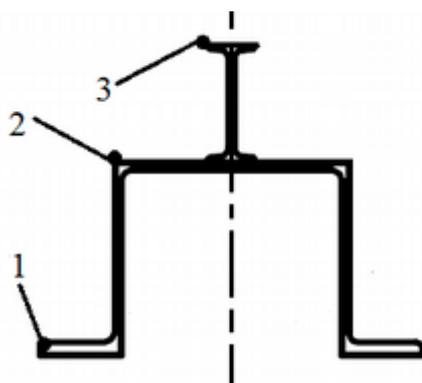


Рисунок 4.4 — Поперечное сечение хребтовой балки полувагона с разгрузочными люками

Таблица 4.1 – Напряжения в хребтовой балке, МПа

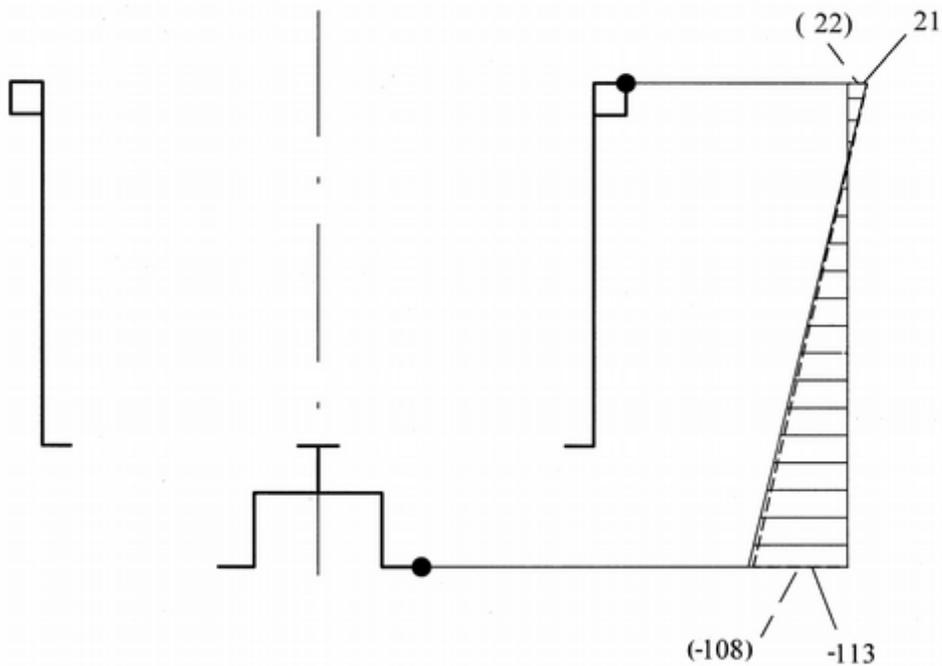
Точка	МКЭ	Расчет аналитическим методом	Погрешность, %
1	31	32,4	4,4
2	26	26,9	3,6
3	21	21,5	2,1

Таким образом, допустимо использовать пластинчато-стержневую модель кузова, выполненную конечными элементами с размерами 200 мм для решения поставленных задач.

При проверке пластинчато-стержневой схемы МКЭ кузова полувагона с разгрузочными люками использована методика [63], примененную при первичных расчетах для проверки кузова глухого типа. Нагрузим ее по I и III режимам и сравним напряжения в двух точках плоской модели и пластинчато-стержневой схемах МКЭ кузова полувагона: первая лежит на верхней обвязке, а вторая – на нижней полке зетового профиля хребтовой балки в среднем поперечном сечении кузова

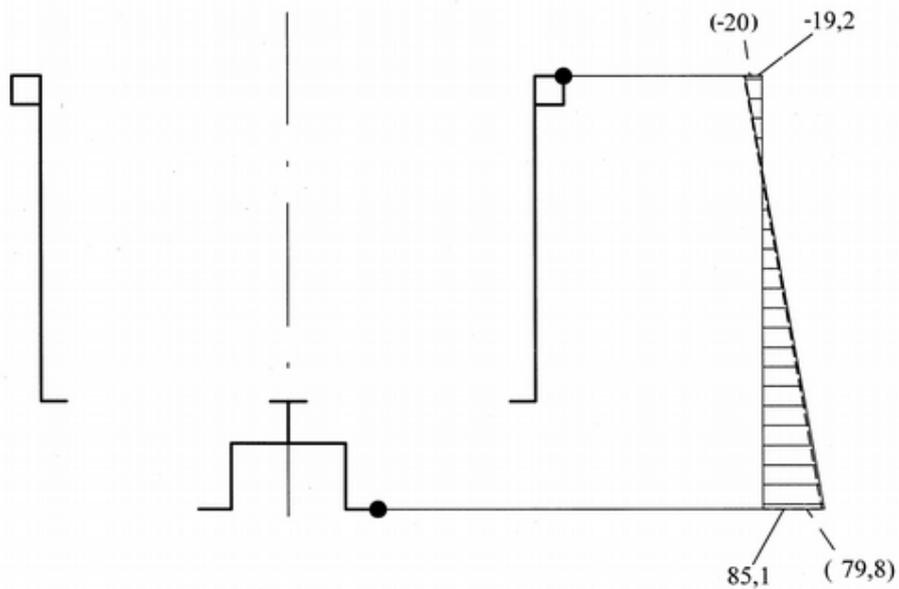
полувагона.

Эпюры напряжений, полученных при расчетах, представлены на рисунках 4.5-4.10.



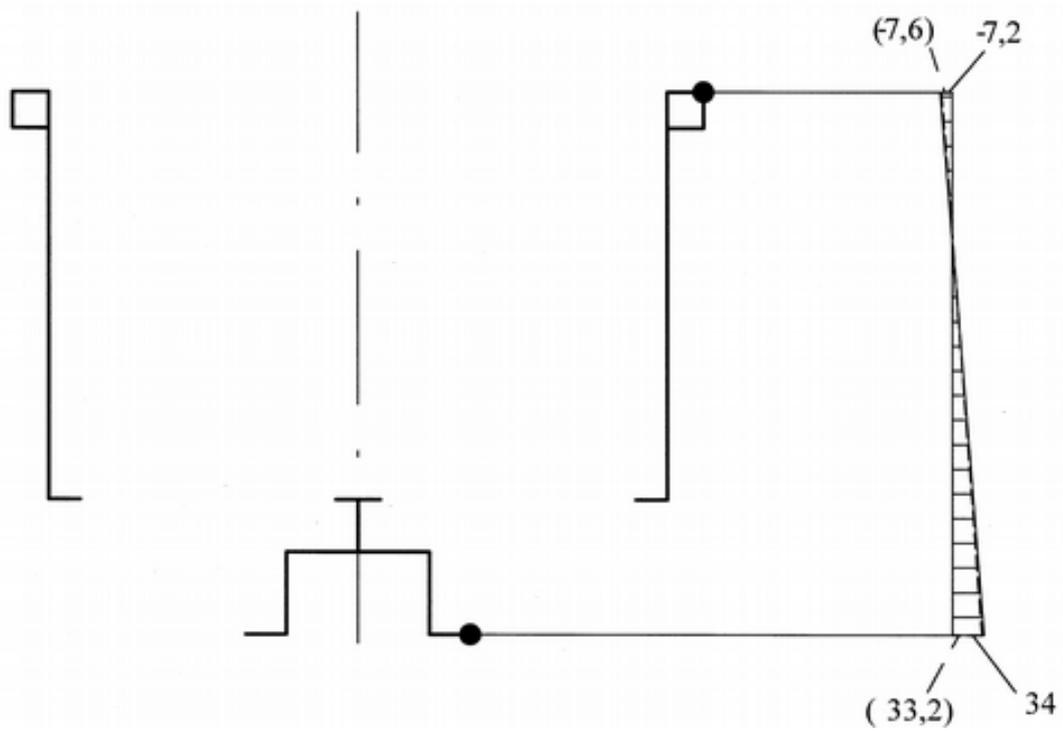
в скобках напряжения в плоской модели кузова полувагона; без скобок — в пластинчато-стержневой модели

Рисунок 4.5 – Эпюры напряжений при нагружении кузова по I а режиму сжимающей продольной нагрузкой



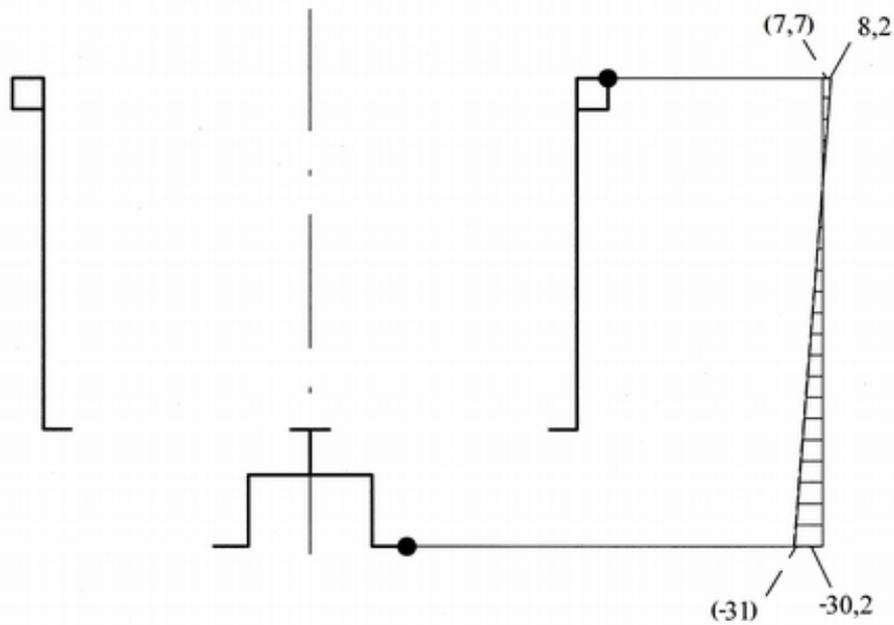
в скобках напряжения в плоской модели кузова полувагона; без скобок — в пластинчато-стержневой модели

Рисунок 4.6 – Эпюры напряжений при нагружении кузова по I б режиму растягивающей продольной нагрузкой



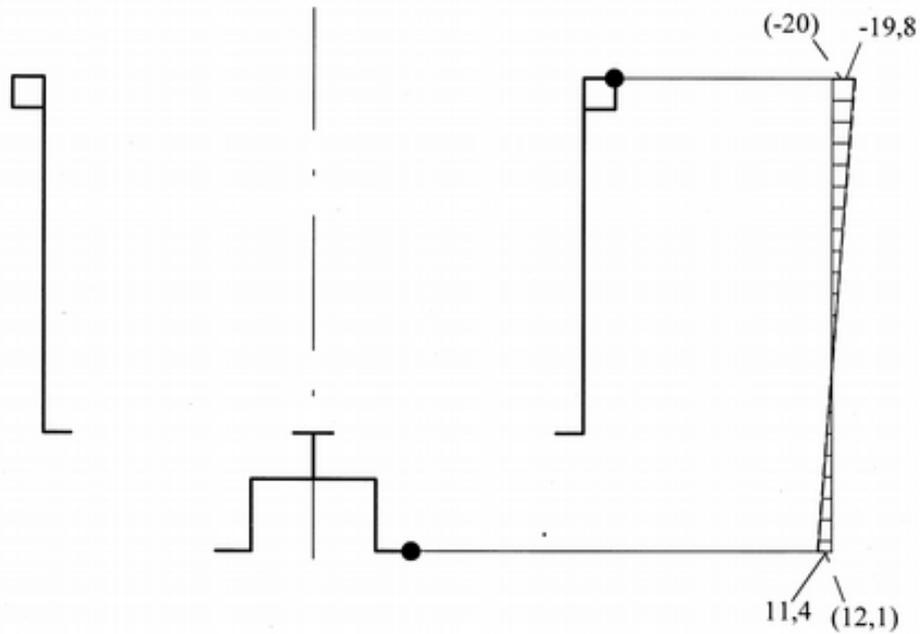
в скобках напряжения в плоской модели кузова полувагона; без скобок — в пластинчато-стержневой модели

Рисунок 4.7 – Эпюры напряжений при нагружении кузова по III а режиму растягивающей продольной нагрузкой



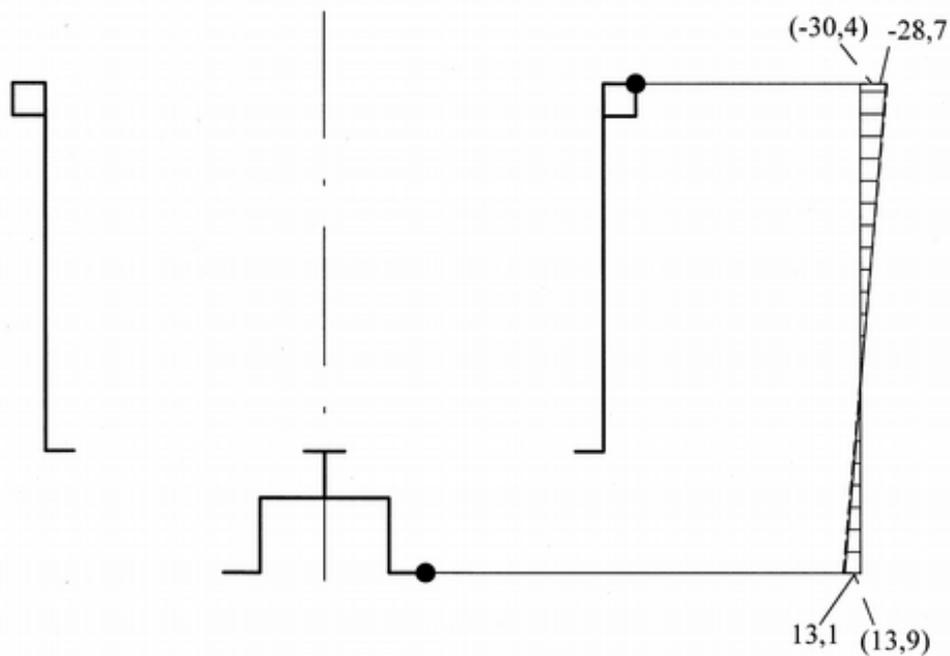
в скобках даны значения напряжений, полученных в плоской модели кузова полувагона; без скобок — в пластинчато-стержневой модели

Рисунок 4.8 – Эпюры напряжений при нагружении кузова по III б режиму сжимающей продольной нагрузкой



в скобках даны значения напряжений, полученных в плоской модели кузова полувагона; без скобок — в пластинчато-стержневой модели

Рисунок 4.9 – Эпюры напряжений при нагружении кузова по I режиму вертикальной нагрузкой



в скобках даны значения напряжений, полученных в плоской модели кузова полувагона; без скобок — в пластинчато-стержневой модели

Рисунок 4.10 – Эпюры напряжений при нагружении кузова по III режиму вертикальной нагрузкой

Так как полученные напряжения меньше допускаемых, приведенных в таблице 2.3, то использование пластинчато– стержневой модели кузова полувагона с разгрузочными люками в раме в дальнейших исследованиях допустимо.

4.2 Результаты расчетов и выводы

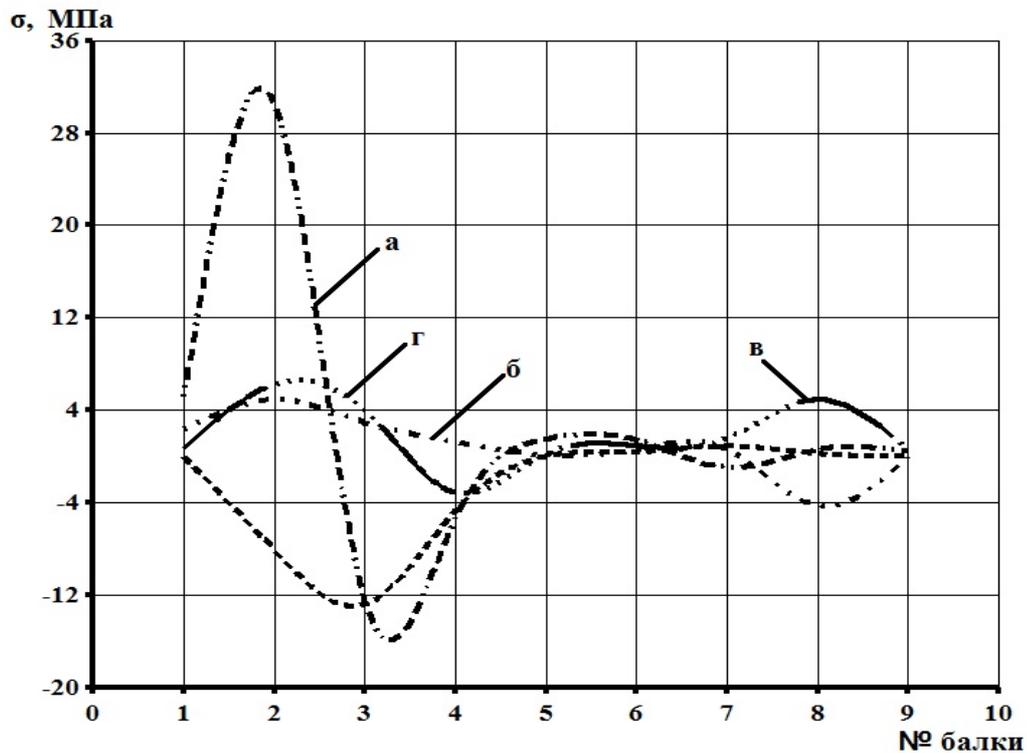
4.2.1 Напряженно-деформированное состояние кузова полувагона с разгрузочными люками

Проведено четыре расчета падений грузов на балки рамы кузова полувагона с разгрузочными люками.

На горизонтальной оси графиков эпюр напряжений цифрами от 1 до 9 пронумерованы поперечные балки рамы, а цифрой 5 – середина хребтовой балки. Номер 1 присвоен концевой балке, ближайшей к шкворневой, на которую уронили груз при первом расчете

Напряжения, возникающие при падении глыб груза на шкворневую балку, представлены на рисунке 4.11. Перемещения в области удара достигают 3,2 мм, что свидетельствует об отсутствии контакта между скользунами кузова полувагона и грузовой тележкой, так как зазор между ними, как правило, составляет 9 мм, поэтому соскок кузова полувагона с тележек маловероятен.

Одной из особенностей этого численного эксперимента являются самые маленькие напряжения в эпицентре удара – 19 МПа [94] из всех проведенных расчетов.



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой нижней обвязкой; в — с неударяемой нижней обвязкой; г – напряжения в продольном сечении кузова, в котором приложена ударная нагрузка

Рисунок 4.11 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения балок рамы при ударе по шкворневой балке

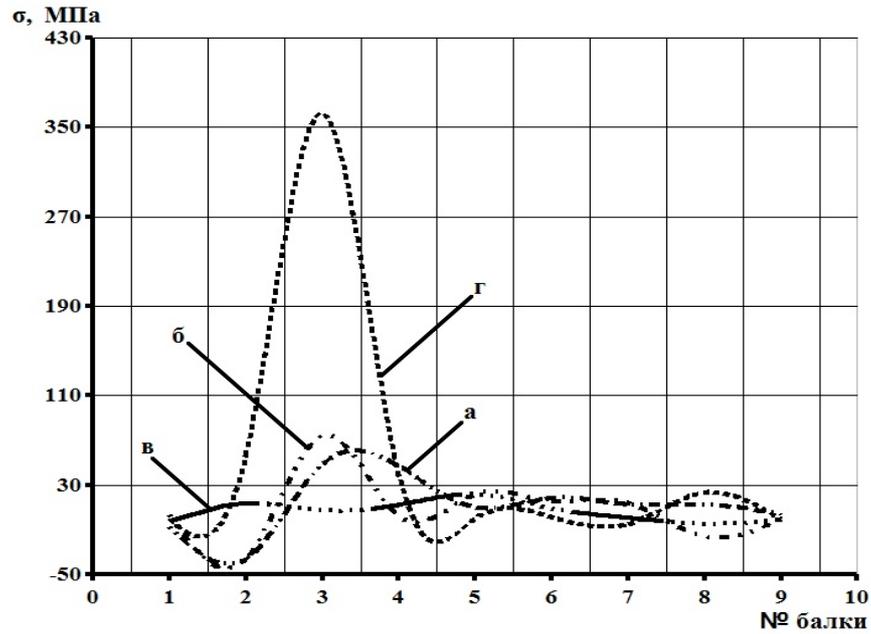
Исследования ударов глыбами первой и второй от шкворневой балок выявило следующие особенности напряженно-деформированного состояния кузова полувагона с люками:

- максимальные напряжения, возникающие в эпицентре удара, в первой промежуточной балке составляют 364 МПа [95], во второй – 284 МПа, а в остальных элементах кузова не превышают 90 МПа;

- максимальные перемещения, полученные при расчетах, достигают 5 мм;

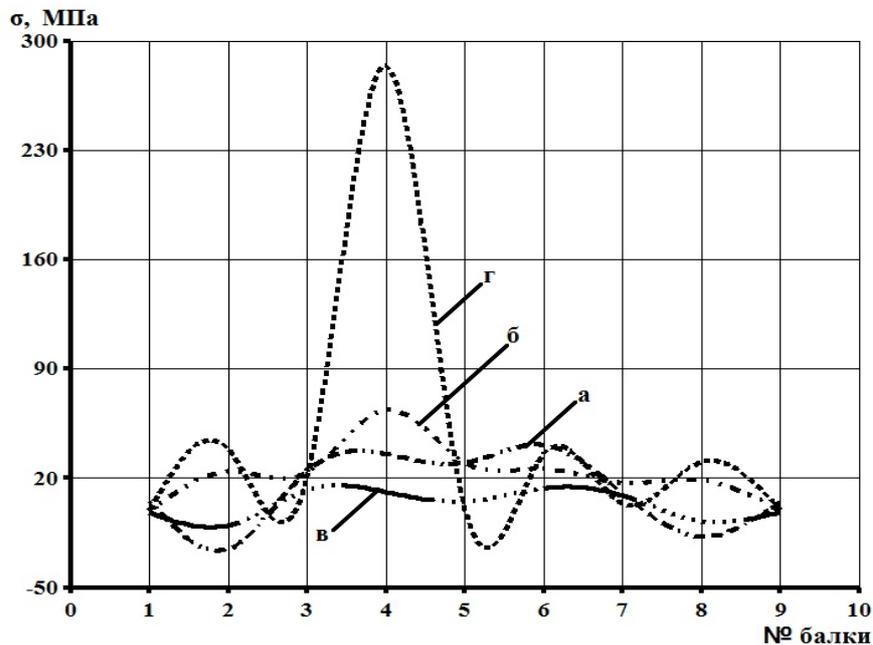
- кузов при падении груза поворачивается относительно своей продольной оси, его ударяемая часть оседает вниз при отгибе вверх противоположной [94].

Эпюры напряжений, возникающих в поперечных сечениях элементов кузова, представлены на рисунках 4.12 и 4.13.



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой нижней обвязкой; в — с неударяемой нижней обвязкой; г – напряжения в продольном сечении кузова, в котором приложена ударная нагрузка

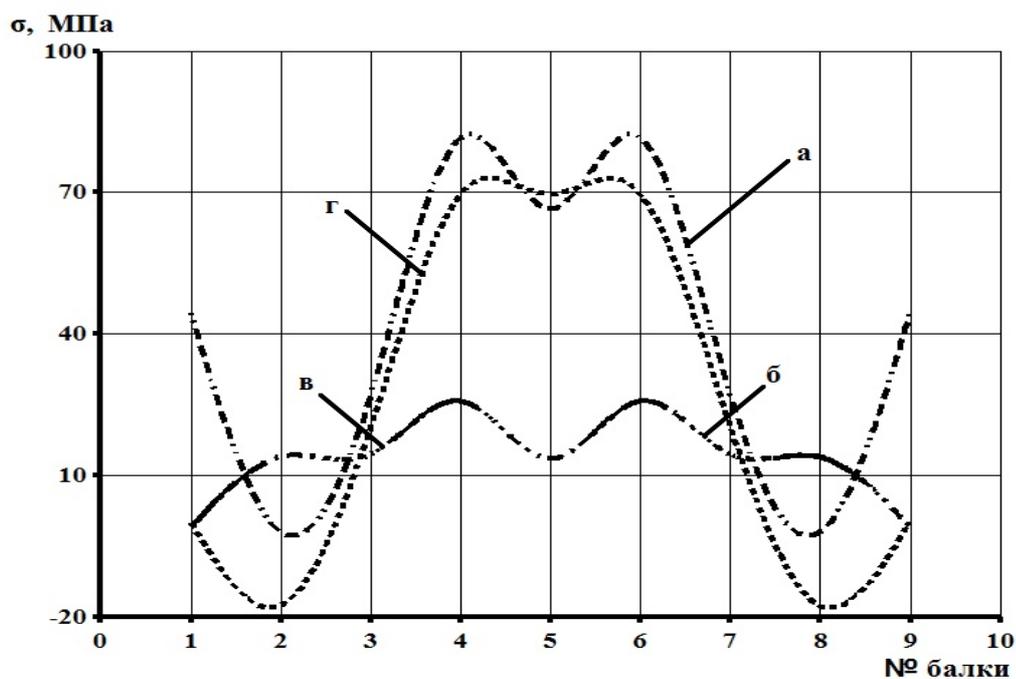
Рисунок 4.12 – Эпюры максимальных динамических напряжений сечениях узлов соединения балок рамы при ударе по первой промежуточной балке



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой нижней обвязкой; в — с неударяемой нижней обвязкой; г – напряжения в продольном сечении кузова, в котором приложена ударная нагрузка

Рисунок 4.13 – Эпюры максимальных динамических напряжений сечениях узлов соединения балок рамы при ударе по ударе по второй промежуточной балке

Особенностями нагруженности кузова полувагона при ударном воздействии на середину хребтовой балки являются следующие: напряжения в точке приложения ударной силы составляют 84 МПа [95], а в консольной части незначительны (рисунок 4.14); отсутствует поворот кузова на длине базы вагона относительно продольной оси; наблюдается прогиб вниз балок рамы, расположенных вблизи удара [94].



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой нижней обвязкой; в – с неударяемой нижней обвязкой; г – напряжения в продольном сечении кузова, в котором приложена ударная нагрузка

Рисунок 4.14 – Эпюры максимальных динамических напряжений сечений узлов соединения балок рамы при ударе середины хребтовой балки

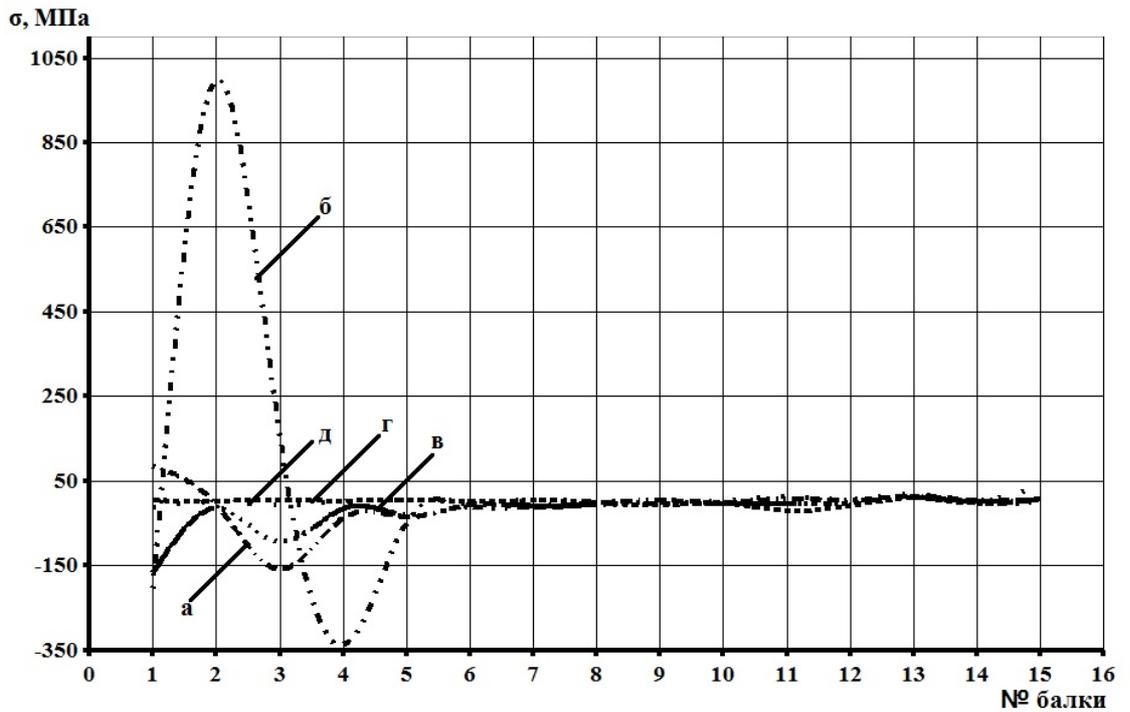
4.2.2 Напряженно-деформированное состояние полувагона с кузовом глухого типа

Для создания картины напряженно-деформированного состояния кузова полувагона глухого типа при падении глыб грузов с уступами, обращенными вниз, было проведено 8 численных экспериментов [96].

При падении глыбы груза на середину участка продольной поддерживающей балки, расположенного между концевой и шкворневой балками, напряжения составили 998 МПа в точке приложения ударной нагрузки, а в поперечных балках рамы, близлежащих к эпицентру удара напряжения достигли следующих значений: в концевой – 205 МПа, в шкворневой – 140 МПа, в первой от шкворневой промежуточной – 340 МПа, в остальных элементах не превышают 100 МПа [96]. Итак, область рамы полувагона, испытывающая максимальные воздействие от глыбы груза массой 500 кг, ограничена окружностью с радиусом 2,7 м от точки приложения ударной нагрузки, лежащего на середине участка продольной поддерживающей настил пола балке.

Кузов поворачивается относительно своей продольной оси (хребтовой балки): ударяемая область консоли проседает вниз, а противоположная часть кузова отгибается вверх.

Эпюры напряжений, возникающих в сечениях узлов соединения балок рамы между собой и с нижними обвязками стен, представлены на рисунке 4.15.

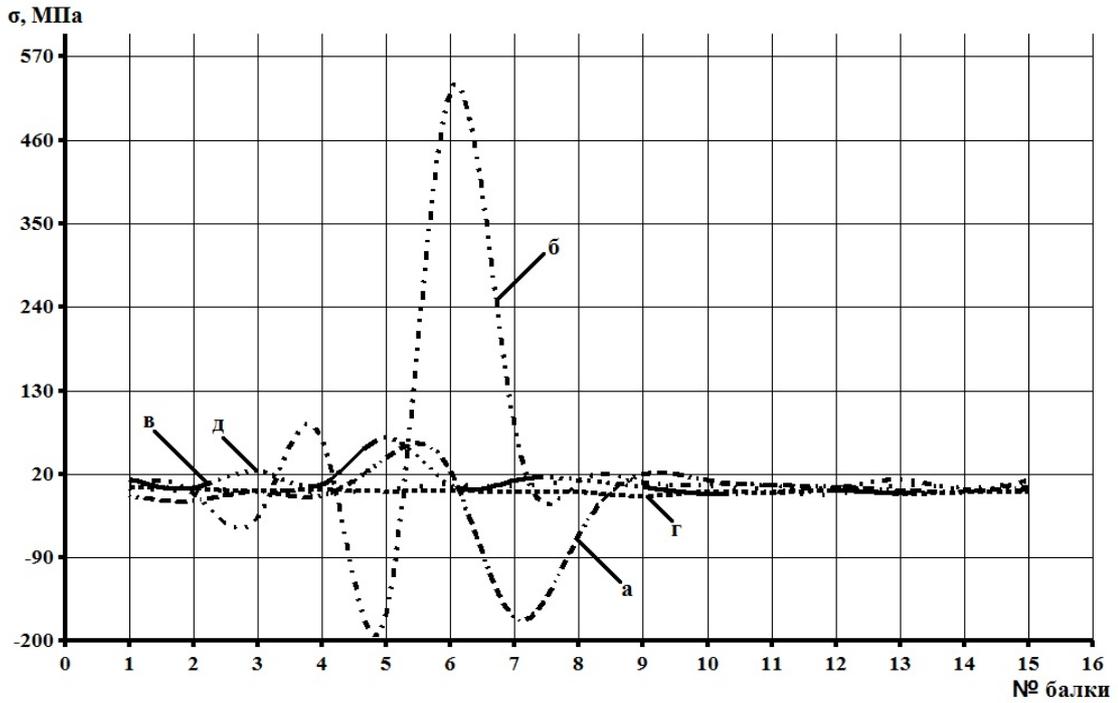


а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 4.15 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на продольную поддерживающую балку между концевой и шкворневой балками

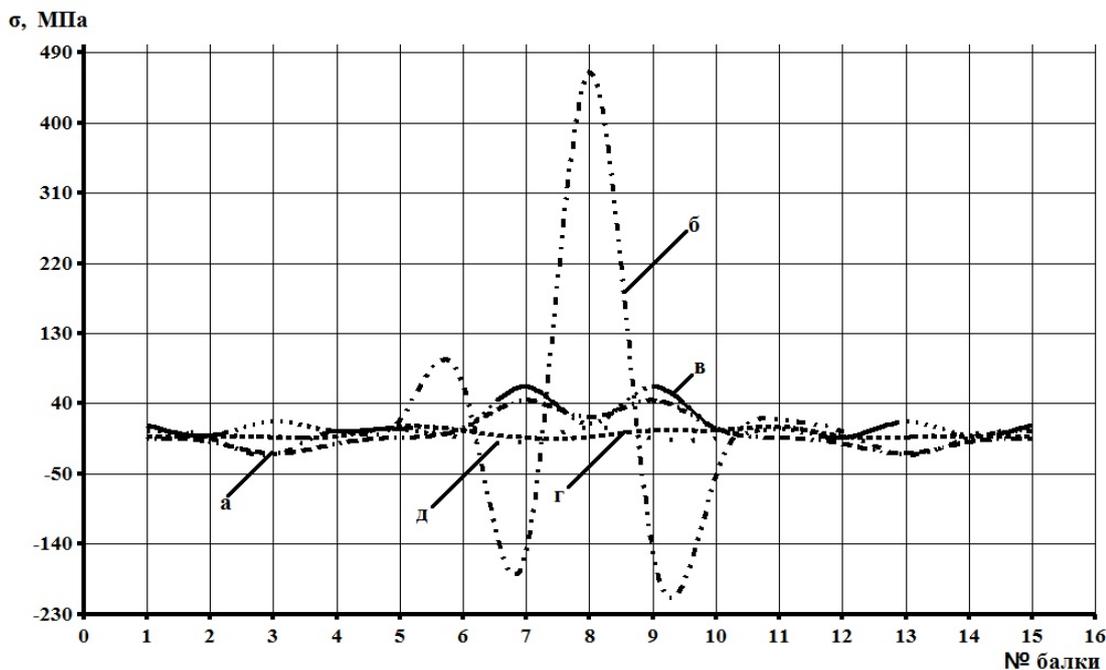
При ударе глыбой груза участка продольной поддерживающей балки, расположенного между шкворневой и первой от нее промежуточной балками, в узле, к которому приложена нагрузка, напряжения достигают 908 МПа, а на соседних участках – 300 МПа. При этом в середине кузова глухого типа происходит стесненное кручение хребтовой балки.

Возникающие при падении груза, напряжения в серединах участков продольной поддерживающей настил пола балки между первой, второй, и третьей от шкворневой промежуточными балками, достигли значений, приведенных на эпюрах (рисунки 4.16, 4.17).



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 4.16 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на продольную поддерживающую балку между первой и второй промежуточными балками



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 4.17 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на продольную поддерживающую балку между второй и третьей промежуточными балками

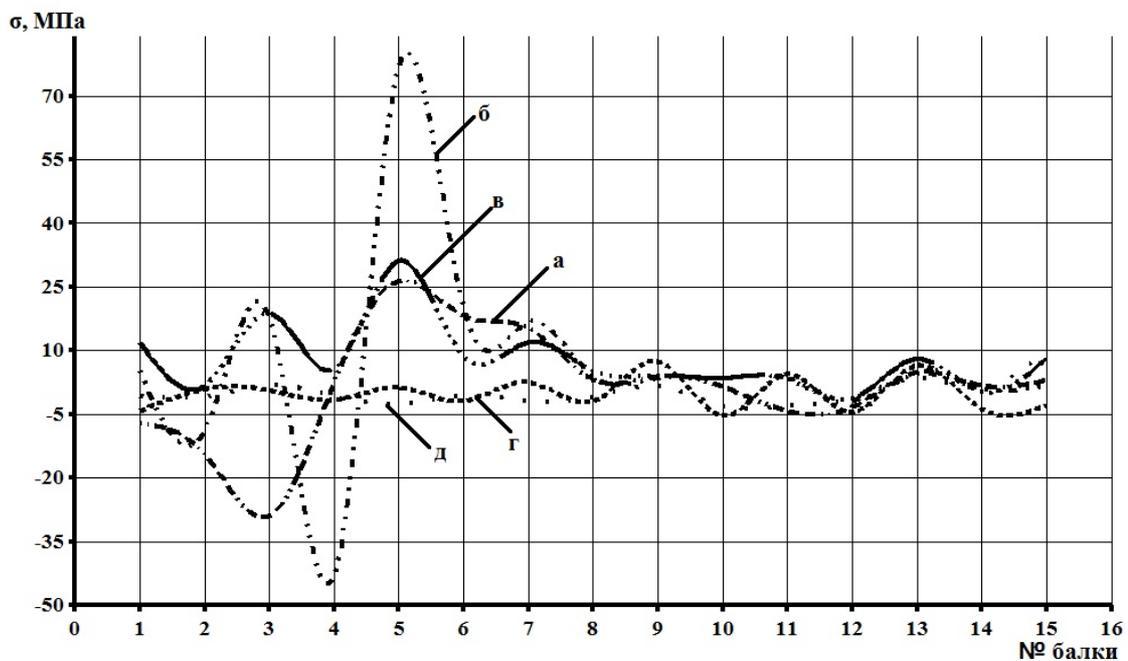
В ходе исследования установлено:

- напряжения в эпицентрах ударов не превышают 530 МПа, а на соседних участках поддерживающей балки уменьшаются в 3 раза;
- в близлежащих к удару поперечных балках рамы напряжения достигают 100 МПа;
- чем ближе ударяемый участок продольной балки к середине вагона, тем угол поворота кузова относительно своей продольной оси меньше, но при этом увеличивается область проседания рамы вниз;
- максимальные перемещения в элементах рамы, полученные при расчетах, составляют 11 мм.

Напряженно-деформированное состояние кузова полувагона глухого типа

при ударах по первой (рисунок 4.18) и второй от шкворневой промежуточным балкам описывается следующими результатами расчетов [96]:

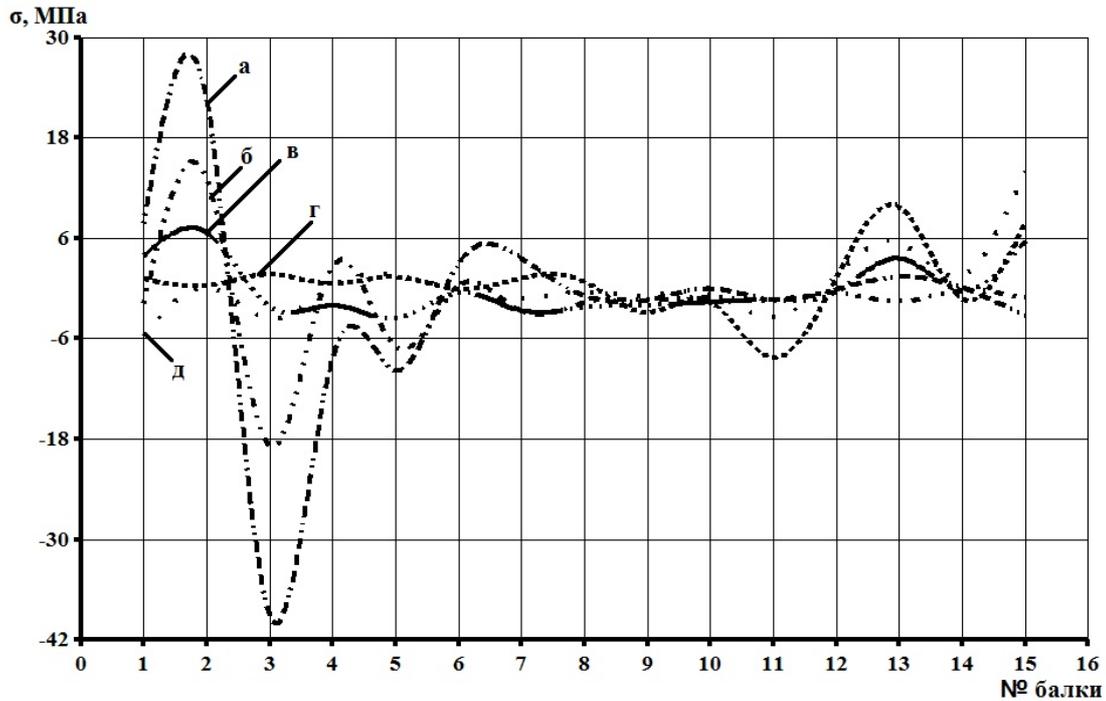
- максимальные напряжения не превышают 80 МПа, а напряжения в остальных элементах составляют 45 МПа при перемещениях до 8 мм;
- происходит небольшой поворот кузова относительно своей продольной оси, при этом проседает середина кузова.



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 4.18 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на первую от шкворневой балку

При ударном воздействии груза массой 500 кг на шкворневой балку соскок кузова с тележки маловероятен, так как напряжения в эпицентре удара составляют 21 МПа (рисунок 4.19), а перемещения – около 4 мм [96].



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 4.19 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на шкворневую балку

При падении груза на середину хребтовой балки напряжения достигают 25 МПа в промежуточных балках и 39 МПа в эпицентре удара [96].

4.3 Анализ полученных результатов

Напряженно-деформированное состояние кузовов полувагонов различных типов имеет следующие особенности:

1 Пик напряжений при ударах кузова полувагона глухого типа возникает в продольной поддерживающей настил пола балке между концевой и шкворневой балками и достигают – 998 МПа [96], а пик напряжений при ударах полувагона с разгрузочными люками возникает в первой промежуточной балке и достигает 364 МПа [94, 95].

2 Для обоих типов кузовов полувагонов напряжения в области шкворневого узла небольшие: для глухого типа – 25 МПа, а с разгрузочными люками – 38 МПа, при этом перемещения в области скользунов не превысили 5 мм, а по нормативным документам зазор между ними допускается до 9 мм, и поэтому не возникнет реакция сил, ведущих к опрокидыванию кузова[97].

3 Максимальные напряжения при ударах первой и второй промежуточных от шкворневой балок кузова полувагона глухого типа меньше (67 МПа и 65 МПа [96]), чем в кузове полувагона с разгрузочными люками (365 МПа и 324 МПа [95]), так как у него удар приходится в крестовину, образованную продольными и поперечными балками рамы. Поэтому можно выдвинуть предположение, что ресурс рамы амортизации энергии удара падающей глыбы у полувагона глухого типа выше, чем у вагона с разгрузочными люками за счет дополнительных продольных подкрепляющих балок. Он зависит в первую очередь от расположения в структурной схеме рамы балки, на которую упал груз, а потом от размеров ее поперечного сечения [97].

Наиболее нагруженной из поперечных балок рамы является первая от шкворневой промежуточная балка, в которой происходит смена знака напряжений, возникающих при падении глыбы груза.

4 При ударе середины кузовов в хребтовой балке кузова полувагона с люками напряжения составили 85 МПа, а в кузове глухого типа – 45 МПа. Напряжения в продольной поддерживающей настил пола рамы балке, расположенной между второй и третьей промежуточными балками в кузове глухого типа составили 453 МПа [96].

Таким образом, амортизационные свойства рамы в центре кузова выше, чем в его консольных частях.

5 При ударе удаленная от него часть кузова смещается вверх, а близлежащая – вниз. Это связано со схемой опирания кузовов полувагонов на тележки и мощными хребтовыми балками.

6 Промежуточные балки изгибаются на расстоянии 100 мм от узла соединения с хребтовой балкой рамы во всех численных экспериментах.

7 Наиболее прочными для обоих типов кузовов полувагонов являются узлы соединения хребтовых и промежуточных балок. У полувагона с кузовом глухого типа – узел соединения поперечных и продольных балок.

4.4 Выводы по разделу 4

Напряжения и перемещения в элементах рамы кузова полувагонов при падении на них глыбы груза в большей степени зависят от расположения эпицентра удара в структурной схеме, чем от размеров поперечных сечений балок.

На ресурс рамы кузова амортизировать энергию падающей глыбы влияют поддерживающие продольные балки, они снижают напряжения в эпицентре удара при падении груза на середину поперечных балок.

При падении грузов на элементы консольных частей рамы напряжения в кузовах обоих типов выше, чем при ударах по балкам, расположенным в середине.

При ударах продольных поддерживающих балок кузова полувагона глухого типа напряжения в эпицентре сопоставимы с динамическим пределом текучести стали.

Результаты исследований обоих типов несущих систем показывают, что напряжения превышают допускаемые значения, прописанные в «Нормах ...» и ГОСТ 33211–2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» для стали 09Г2С [2, 3].

5 ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ КУЗОВА ПОЛУВАГОНА ГЛУХОГО ТИПА С РАЗЛИЧНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ ПОДКРЕПЛЕНИЯ НАСТИЛА РАМЫ

5.1 Определение метода расчета и граничных условий

Исследования проведем по схеме:

- формирование конечноэлементных пластинчато-стежневых моделей;
- расчет кузовов на ударную нагрузку с приведением массы кузова к точке удара и вычислением коэффициентов динамичности и с их помощью определение динамических напряжений и перемещений, возникающих в моделях кузовов;
- сопоставление картин напряженно-деформированных состояний кузовов полувагонов с различными вариантами конструкций подкрепления настила пола.

Методика расчета назначена такая же, что и при первичном расчете: расчет кузовов на ударную нагрузку с приведением массы кузова к точке удара и вычислением коэффициента динамичности, рассчитанного по зависимости (2.11), определены значения динамических напряжений по формуле (2.12) и проведен анализ полученных результатов, в соответствии с требованиями прочности к элементам рамы аналитического выражения (2.13).

Для исследования ударного процесса введены граничные условия, которые применялись при предыдущих расчетах и были описаны во второй и третьей главах, кратко перечислим основные положения:

- полувагон неподвижно стоит на железнодорожных путях, его кузов опирается на тележки, замененные на два шарнира: подвижный и неподвижный;
- подсыпной слой из мелких фракций руды отсутствует на раме кузова;
- сыпучие и аморфные свойства глыбы груза не учитываются.

У всех моделей с предлагаемыми вариантами подкрепления настила пола боковые и торцевые стены, поперечные и хребтовая балки рамы такие же, как в кузове полувагона модели 12-1592.

Проверка пластинчато-стержневых моделей кузовов полувагонов глухого типа, имеющих различные варианты подкрепления настила пола, не проведена, так как: во- первых, были проведены верификации при первичных и проверочных расчетах схем МКЭ кузова полувагона модели 12-1592, во-вторых, удар глыбы прежде всего влияет на местную прочность кузова, что подтверждают проведенные ранее расчеты

Исследование проводилось в среде программного комплекса Siemens PLM Femap [77].

С целью получения картин напряженно-деформированного состояния кузовов полувагонов глухого типа с различными конструкциями подкрепления настила пола проведем исследования ударов грузов по следующим балкам рамы:

1) середине хребтовой балки (значимость этого численного эксперимента объясняется тем, что в случае возникновения в середине вагона остаточных деформации возникнут дополнительные изгибающие моменты, которые усилят нагруженность несущей системы кузова полувагона);

2) продольной поддерживающей настил пола балке, расположенной между второй и третьей от шкворневой промежуточными балками (значимость объясняется угрозой потери местной устойчивости балок рамы);

3) продольной поддерживающей настил пола балке, расположенной между шкворневой и первой от нее промежуточной балками (это один из самых нагруженных участков подкрепления настила, следовательно, высокий риск местной потери устойчивости);

4) первой от шкворневой промежуточной балке, одной из самых нагруженных поперечных балок у полувагонов обоих типов.

5.2 Особенности нагруженности кузова полувагона глухого типа с подкреплением настила шестью гнутыми швеллерами

Отличия исследуемой (рисунок 5.1) конечноэлементной пластинчато-стержневой модели от примененной при первичных расчетах кузова полувагона 12-1592:

- состоит из 1432 стержневых и 2708 пластинчатых элементов и имеет $2,48 \cdot 10^4$ степеней свободы;

- настил пола подкреплен шестью швеллерами 100x60x5 мм. Такая конструкции подкрепления применялась у крытого вагона модели 11-217 [98].

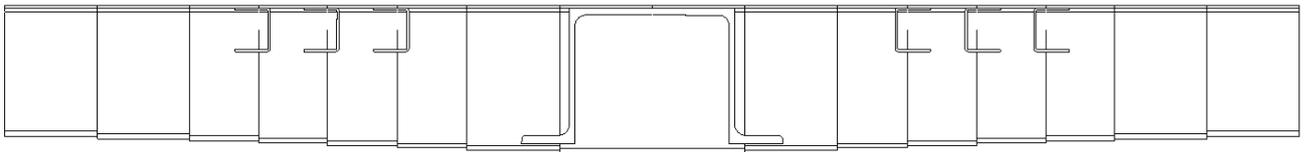
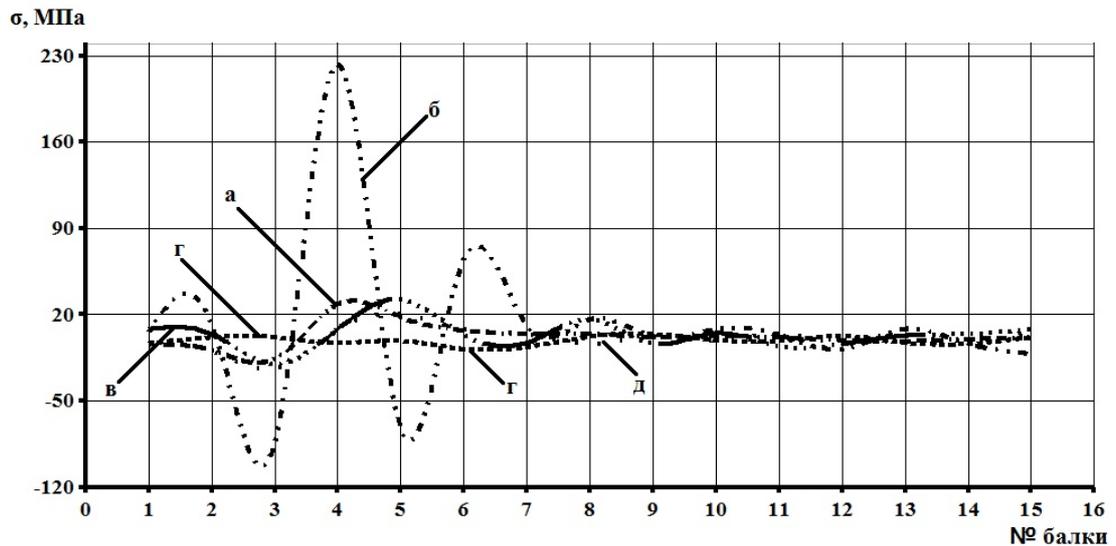


Рисунок 5.1 – Поперечное сечение рамы полувагона с шестью швеллерами

В ходе исследования погрузки груза были получены следующие результаты.

При падении груза на участок продольной балки, расположенный между шкворневой и первой от нее промежуточной балками, максимальные напряжения достигли значений, приведенных на рисунке 5.2.



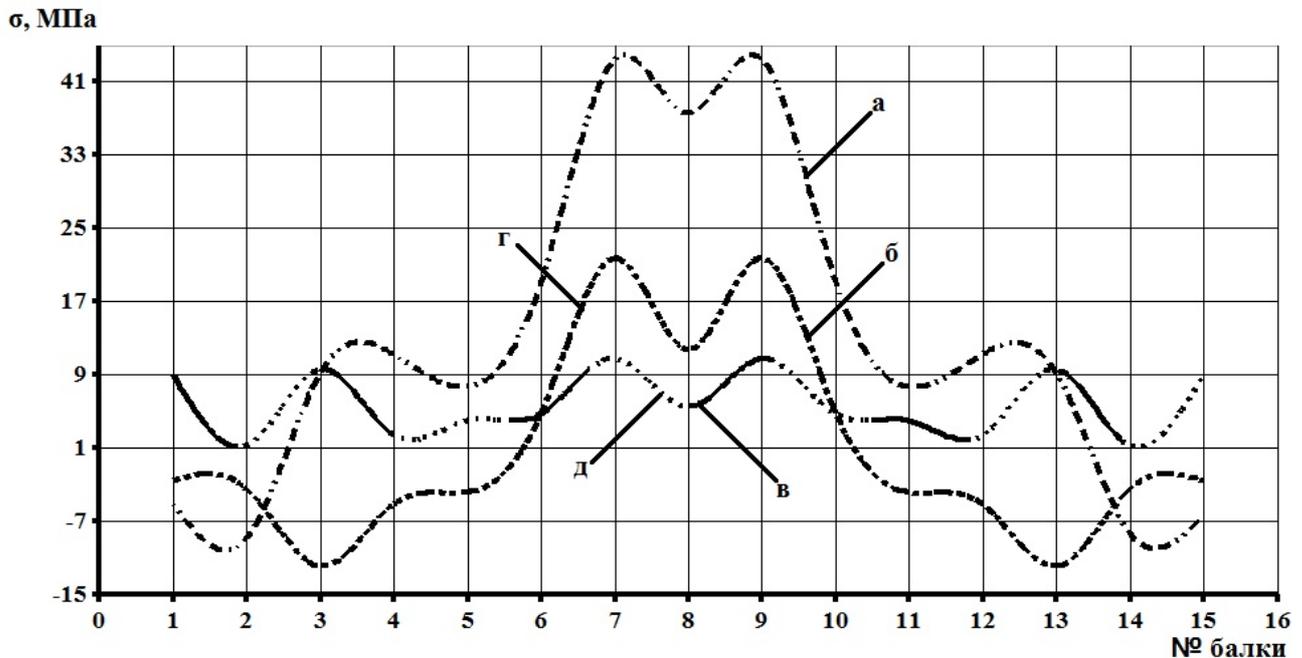
а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 5.2 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на продольную поддерживающую балку между шкворневой и первой от нее промежуточной балками

Происходит прогиб вниз половины шкворневой и соседних к эпицентру удара промежуточных балок, а кузов закручивается относительно хребтовой балки.

При расчете воздействия падающей глыбы груза на продольную поддерживающую настил балку между второй и третьей от шкворневой промежуточными балками максимальные напряжения составили 137 МПа, во второй промежуточной балке – 82 МПа, а в хребтовой балке на участке между первой и второй промежуточной балками – 35 МПа.

Эпюры напряжений, полученные при расчете падения глыбы на середину хребтовой балки, представлен на рисунке 5.3.



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 5.3 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на хребтовую балку

5.3 Особенности нагруженности кузова полувагона глухого типа с подкреплением настила шестью двутаврами №10

Пластинчато-стержневая модель МКЭ кузова с шестью подкрепляющими настил пола двутаврами №10 (рисунок 5.4) имеет следующие особенности:

- состоит из 1432 стержневых и 2708 пластинчатых элементов и имеет $2,84 \cdot 10^4$ степеней свободы;
- пол подкреплен шестью двутаврами №10, выполненными стержневыми элементами. Такая конструкция подкрепления предложена Д. Г. Бейном в работе

[4], и такую же конструкцию подкрепления пола имеет крытый грузовой вагон модели 11-260 [98].

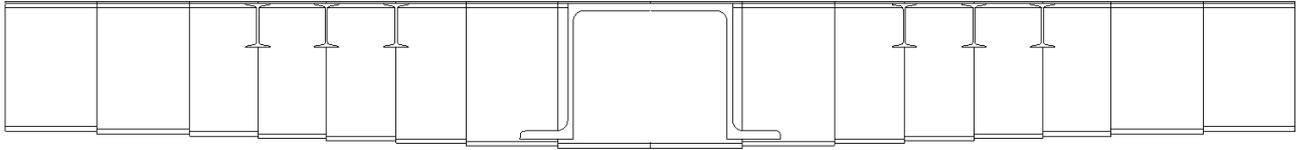
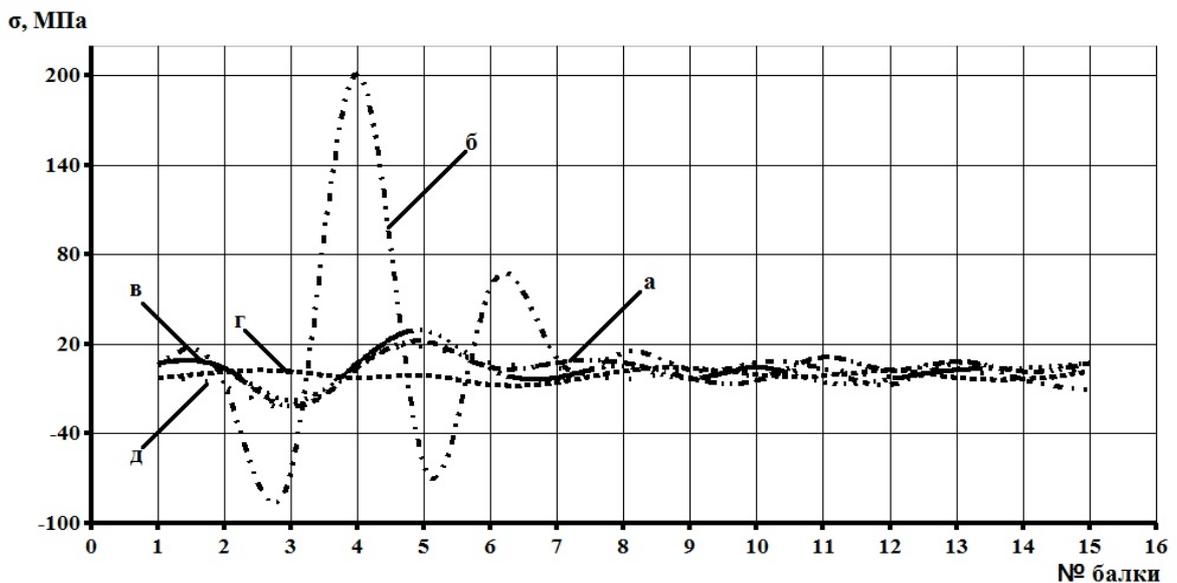


Рисунок 5.4 – Поперечное сечение рамы полувагона с шестью двутаврами № 10

Картина напряженно-деформированного состояния кузова полувагона, настил пола которого подкреплен шестью двутаврами №10, получена четырьмя расчетами.

При ударе глыбой участка продольной подкрепляющей балки, расположенного между шкворневой и первой от нее промежуточной балками, в элементах рамы возникают напряжения, приведенные на рисунке 5.5.



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

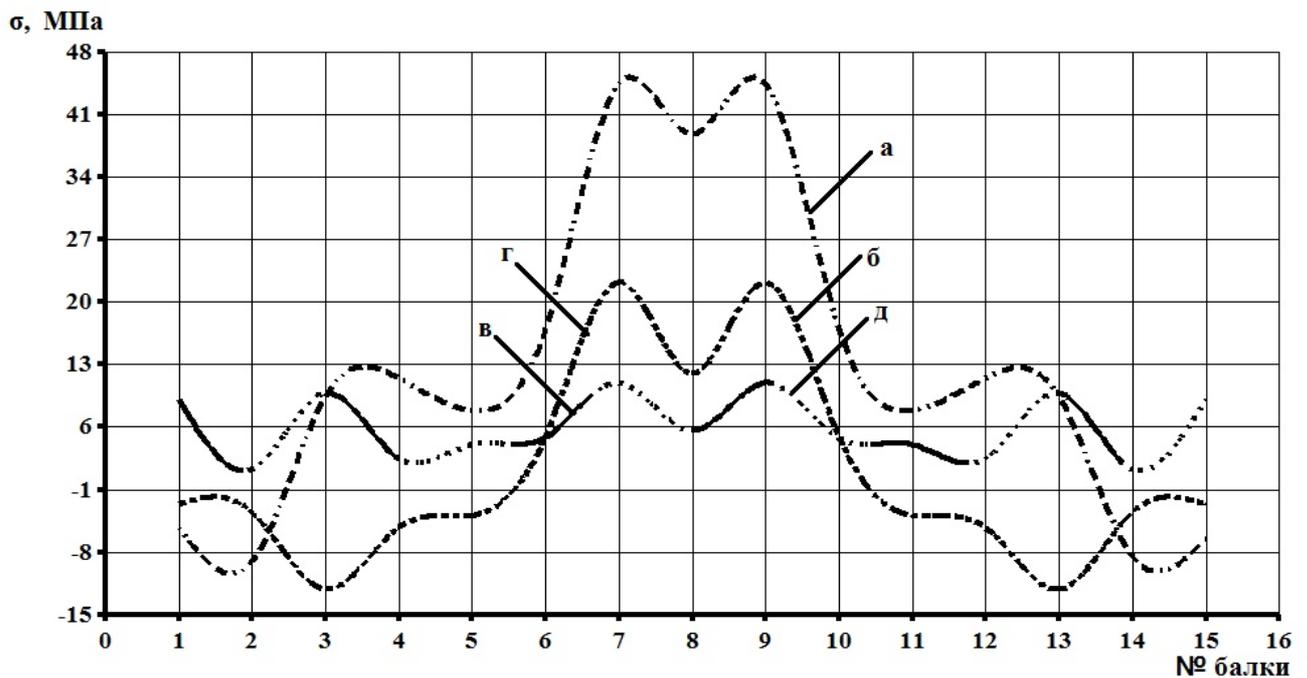
Рисунок 5.5 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы груза на продольную поддерживающую балку между шкворневой и первой от нее промежуточной балками

Консоль кузова полувагона, ближайшая к эпицентру удара, образованная нижней обвязкой, продольной поддерживающей, шкворневой и хребтовой балкой до ее узла соединения с первой промежуточной балкой, прогибается вниз.

Ударное воздействие груза на участок продольной поддерживающей настил балки между второй и третьей промежуточными балками вызывает максимальные напряжения 129 МПа в эпицентре удара. В третьей промежуточной балке они составляют 63 МПа, в четвертой – 34 МПа, а в ударяемой нижней обвязке на участке между второй и третьей промежуточной балками – 71 МПа.

При исследовании удара глыбой первой промежуточной балки возникают следующие напряжения: в эпицентре удара – 58 МПа, а в остальных элементах не более 35 МПа, при этом в обеих концевых балках близки к нулю.

Напряженно-деформированное состояние кузова полувагона при ударе в хребтовую балку представлено на рисунке 5.6.



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 5.6 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы руза на хребтовую балку

5.4 Особенности нагруженности кузова полувагона глухого типа с подкреплением настила рамы четырьмя двутаврами №12

Пластинчато-стержневая модель, с подкрепленным настилом рамы четырьмя двутаврами №12 (рисунок 5.7), имеет следующие особенности:

- состоит из 1297 стержневых и 2708 пластинчатых элементов и имеет $2,4 \cdot 10^4$ степеней свободы;
- пол подкреплен четырьмя двутаврами №12.

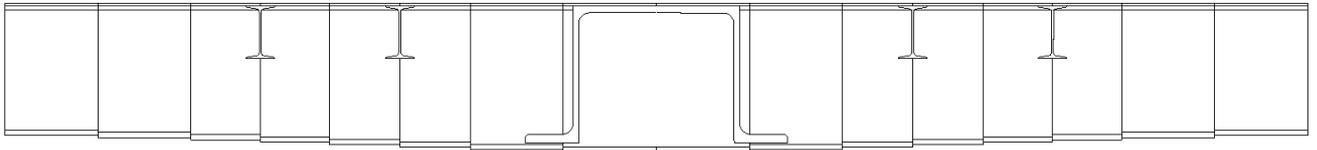
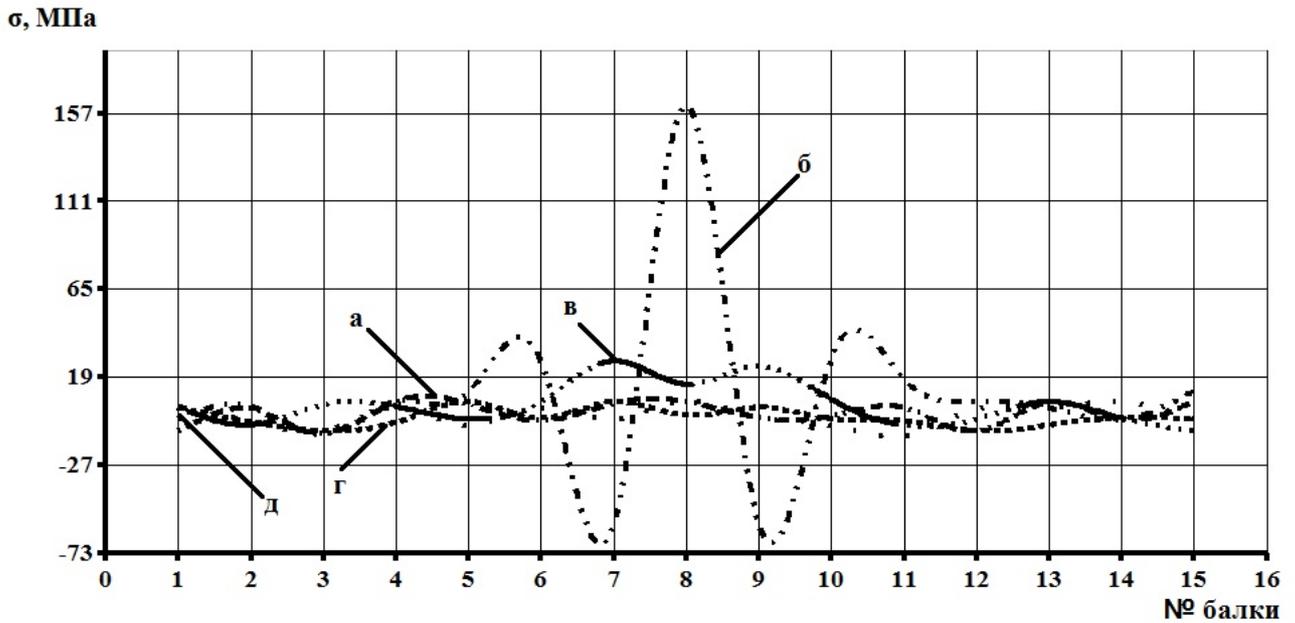


Рисунок 5.7 – Поперечное сечение рамы полувагона с четырьмя двутаврами № 12

Особенности напряженно-деформированного состояния, полученные в ходе расчетов.

Ударное воздействие груза на продольную поддерживающую настил рамы балку между второй и третьей промежуточными балками вызывает максимальные напряжения 297 МПа в эпицентре удара (рисунок 5.8).

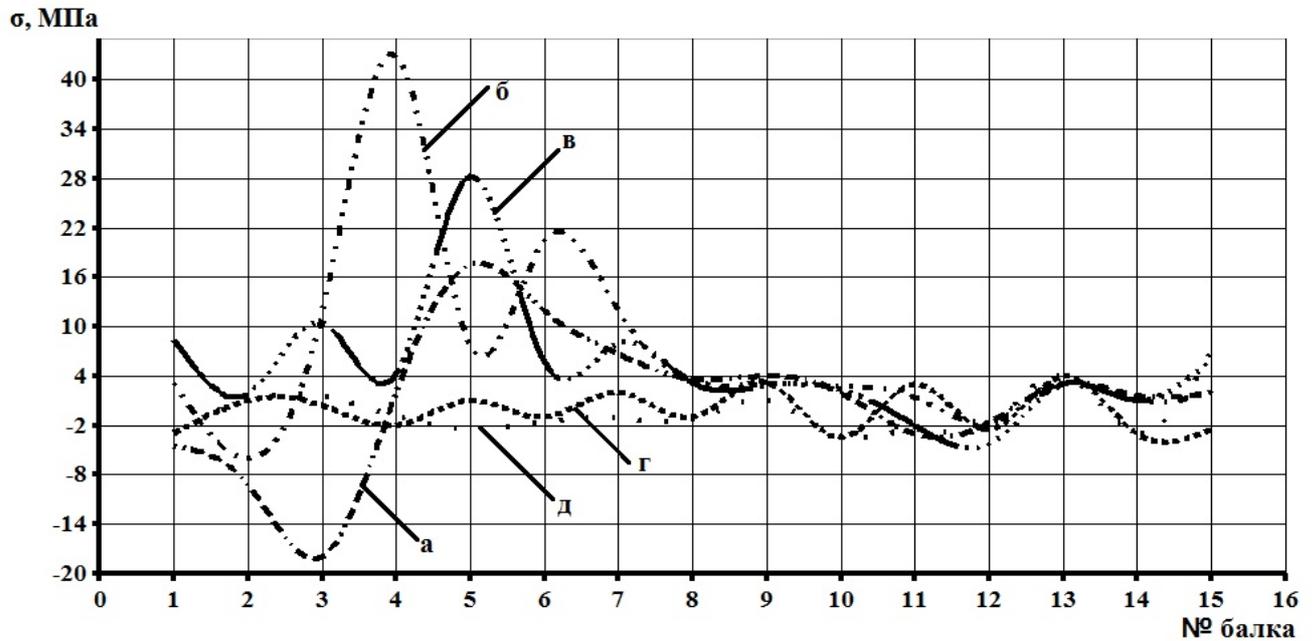


а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 5.8 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы на продольную поддерживающую балку между второй и третьей промежуточными балками

Кузов полувагона проседает вниз в области удара и одновременно поворачивается относительно своей продольной оси (хребтовой балки); шкворневая, промежуточные и ударяемая продольная поддерживающая балки выгибаются вниз вблизи эпицентра удара; скручивание хребтовой балки происходит вблизи узла её соединения с четвёртой промежуточной балкой.

При ударе глыбой в первую промежуточную балку в ней возникают напряжения 43 МПа (рисунок 5.9).



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 5.9 Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы на первую от шкворневой балку

5.5 Особенности нагруженности кузова полувагона глухого типа с составными упругими балками

Конечноэлементная модель кузова глухого типа, с подкрепленным настилом рамы составными упругими балками:

– состоит из 1246 стержневых и 2894 пластинчатых элементов, и имеет $2,5 \cdot 10^4$ степеней свободы;

– ее пол подкреплен двутавром №16, на который установлена резиновая накладка толщиной 50 мм, на хребтовую балку также предусмотрена накладка из резины марки 2962 [99]. На данный вариант конструкции подкрепления настила пола получен патент на полезную модель № 162477 от 27.10.2015 [100].

Особенности предлагаемой конструкции подкрепления продемонстрированы на рисунках 5.10 и 5.11.

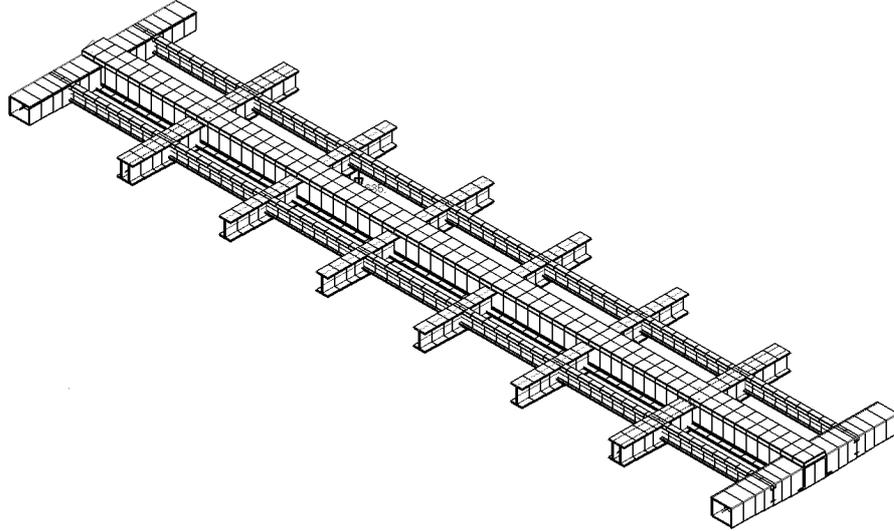


Рисунок 5.10 – Рама кузова полувагона с упругими балками (настил пола условно не показан)

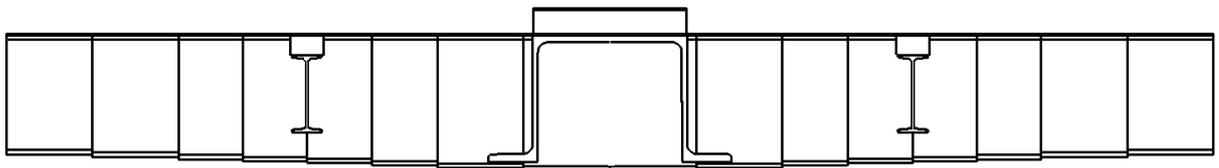
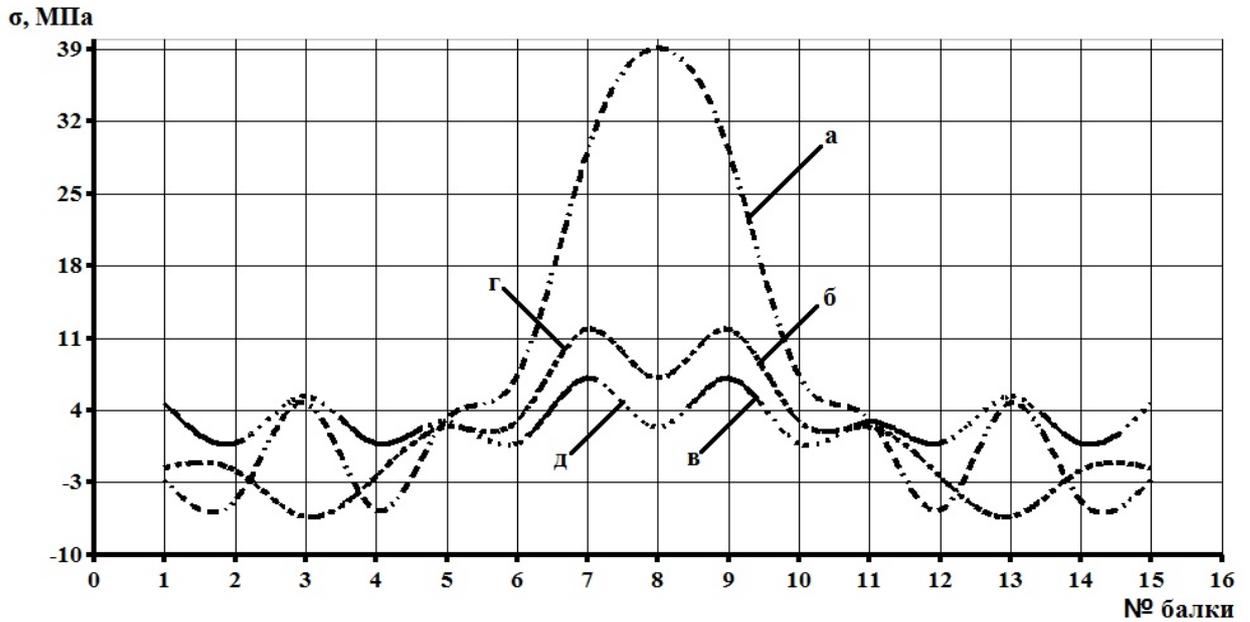


Рисунок 5.11 – Поперечное сечение рамы полувагона с упругими балками (настил пола условно не показан)

Напряженно-деформированное состояние кузова полувагона исследовано четырьмя расчетами ударов: в середину хребтовой балки, первой от шкворневой промежуточной балки и участков продольной поддерживающей балки, расположенной между первой, второй и третьей от шкворневой промежуточными балками.

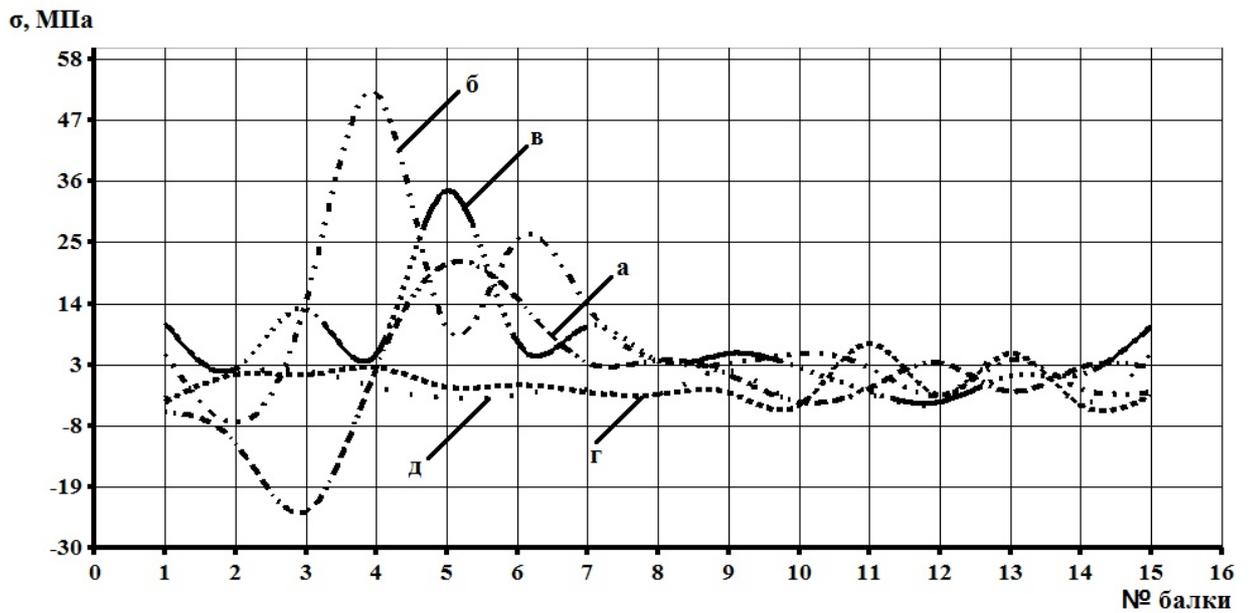
При ударе в середину хребтовой балки напряжения в ней составляют 39 МПа в эпицентре удара, а наибольшее перемещение, равное 4,5 мм, наблюдается во второй и третьей промежуточных балках, в которых напряжения составляют 29 МПа (рисунок 5.12).



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 5.12 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы на хребтовую балку

При ударном воздействии глыбы на первую промежуточную балку, в ней возникают напряжения 52 МПа, а напряжения в остальных элементах представлены на рисунке 5.13.



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 5.13 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы на первую от шкворневой балку

Деформации балок рамы в момент удара представлены на рисунке 5.14.

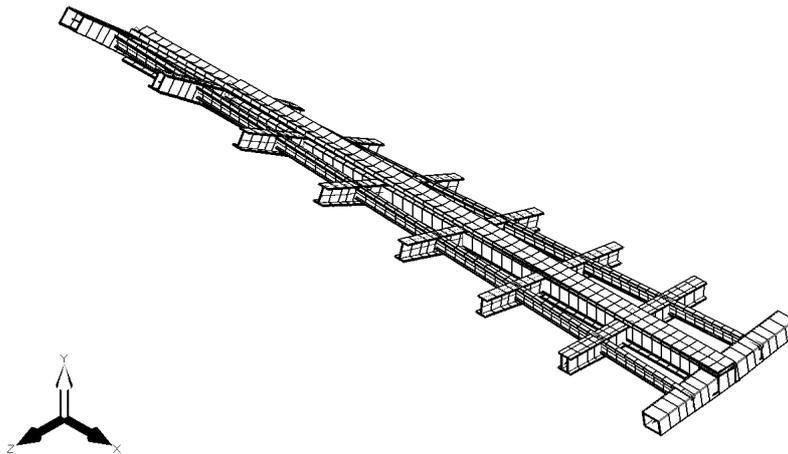
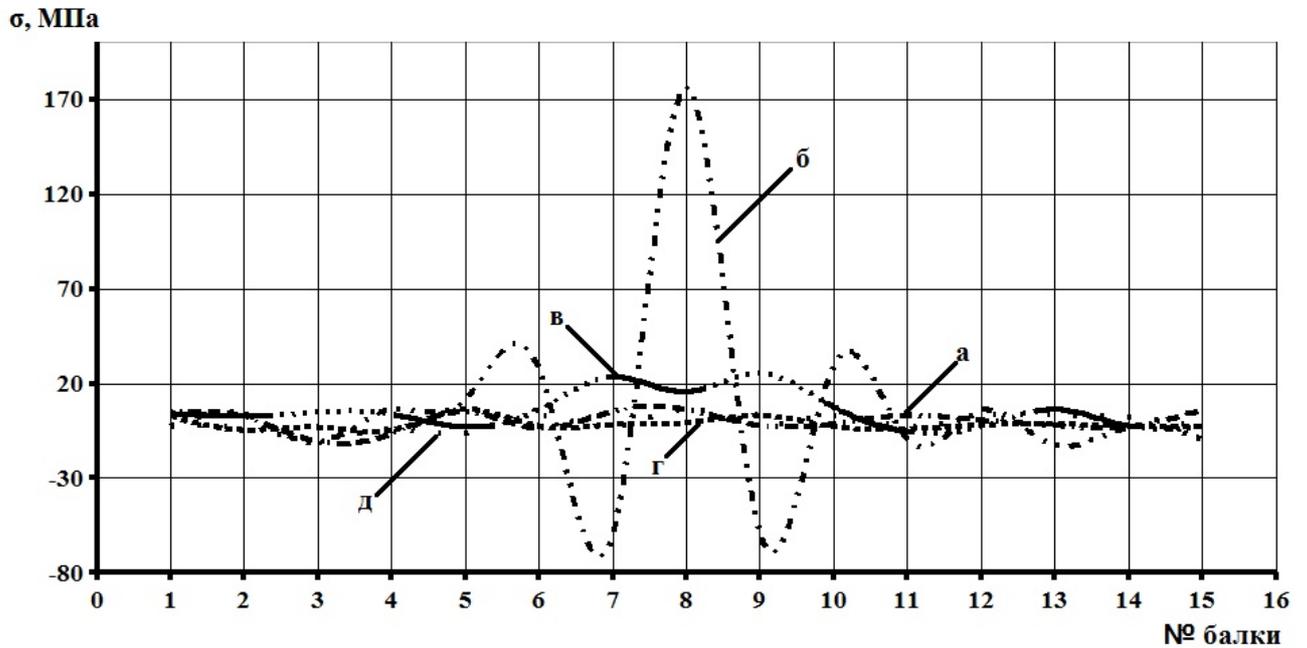


Рисунок 5.14 – Деформированное состояние рамы полувагона с упругими балками при ударе по первой от шкворневой промежуточной балке (настил рамы условно не показан)

При падении груза на продольную балку, расположенную между второй и третьей промежуточными балками, возникают напряжения, показанные на рисунке 5.15. При этом часть кузова полувагона проседает вниз в области удара, а удаленная от него консоль отгибается вверх.



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 5.15 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы на продольную поддерживающую балку между второй и третьей от шкворневой промежуточными балками

5.6 Особенности нагруженности кузова полувагона с двухслойным настилом пола

Пластинчато-стержневая модель кузова полувагона с двухслойным настилом пола имеет следующие особенности:

1) состоит из 1244 стержневых и 2708 пластинчатых элементов и имеет $2,37 \cdot 10^4$ степеней свободы;

2) пол изготовлен из двух листов: верхнего гладкого и нижнего гофрированного, применяемого в качестве обшивки боковой стены (рисунки 5.16–5.17) [97], на данную конструкцию настила рамы получен патент на полезную модель № 116817 от 10.06.2012 [101].

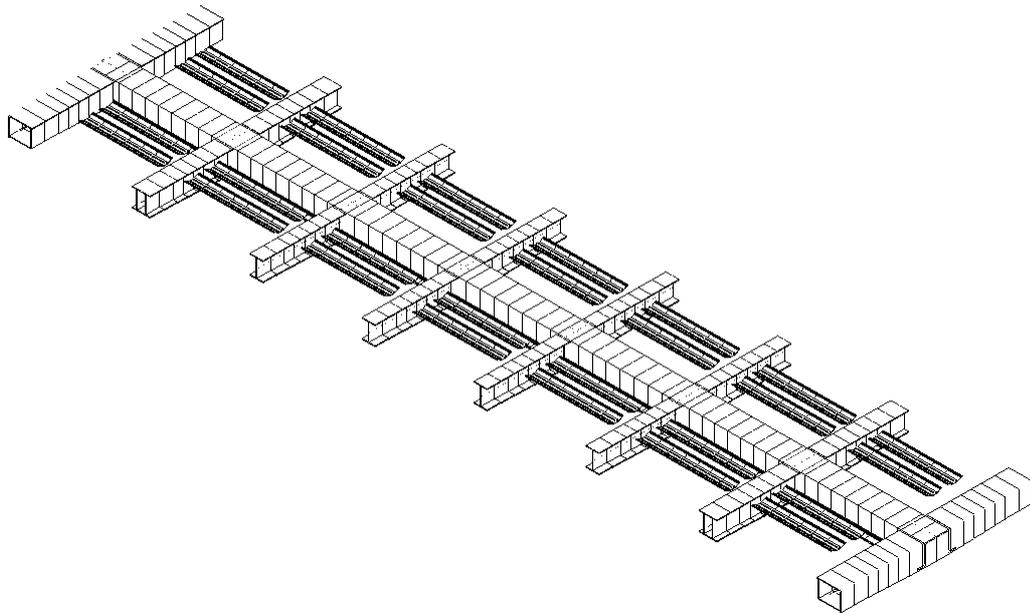


Рисунок 5.16 Рама кузова полувагона с двухслойным настилом пола (верхний лист пола условно не показан)

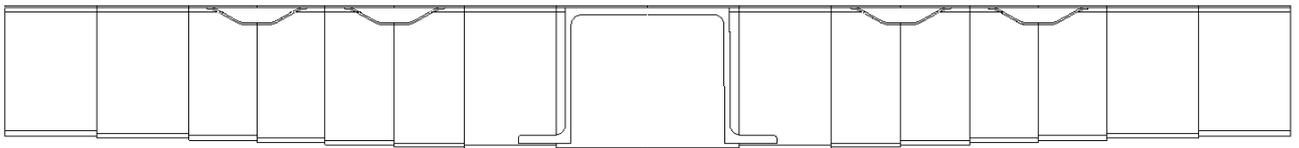
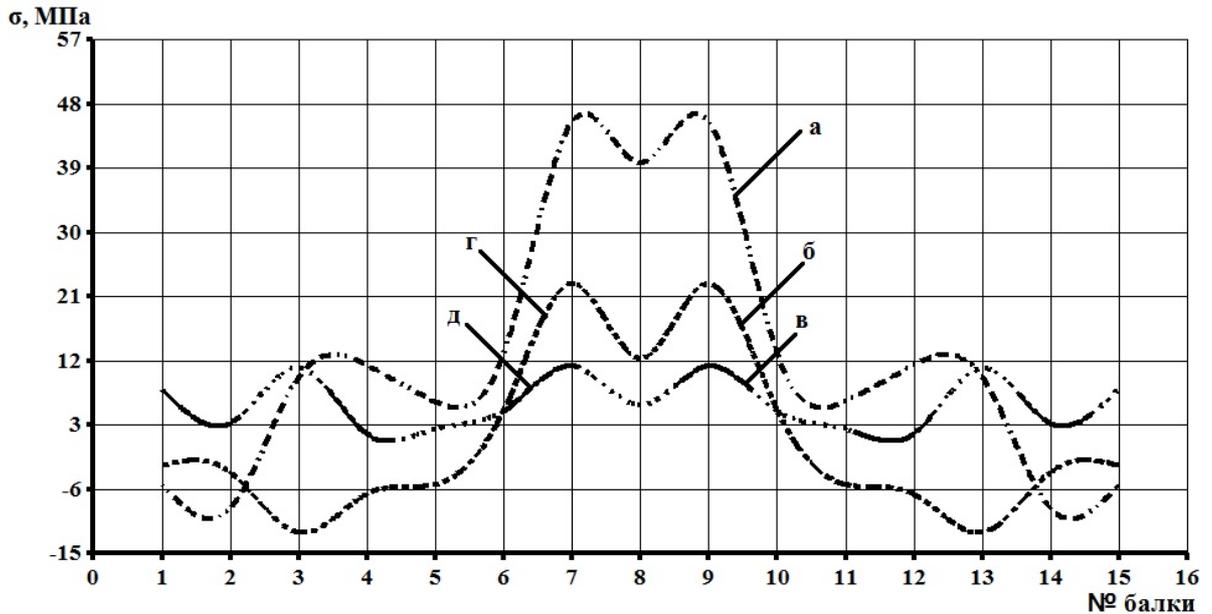


Рисунок 5.17 Поперечное сечение рамы полувагона с двухслойным настилом пола

Напряженно-деформируемое состояние кузова полувагона с двухслойным настилом пола исследовано тремя численными экспериментами – ударами: в хребтовую балку, участки продольной поддерживающей балки, расположенные между первой, второй и третьей от шкворневой промежуточными балками.

При ударе в середину хребтовой балки напряжения достигают значений, приведенных на рисунке 5.18.



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 5.18 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы на хребтовую балку

Деформация рамы представлена на рисунке 5.19.

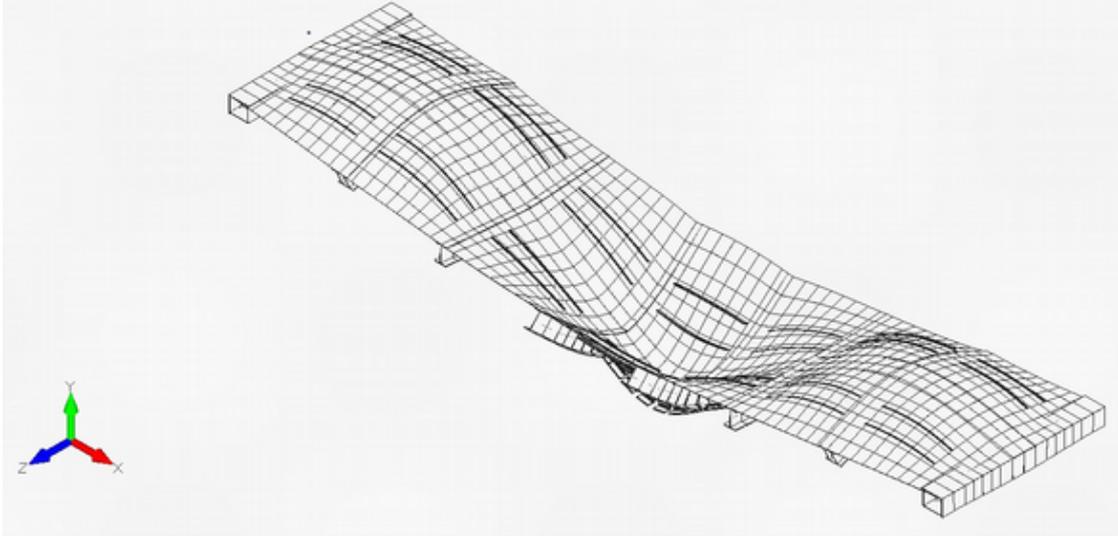
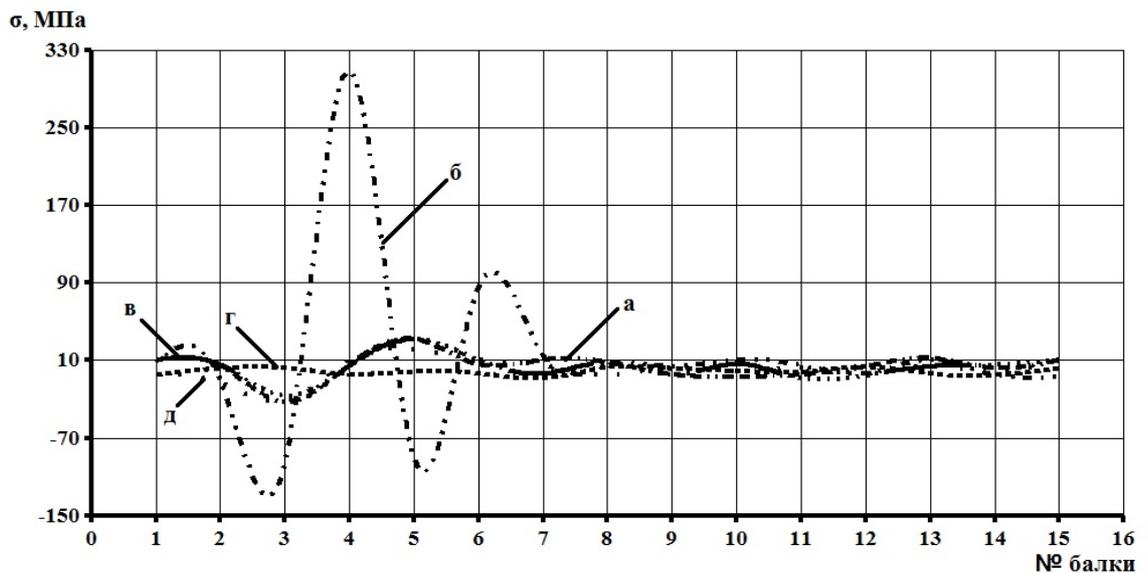


Рисунок 5.19 Деформированное состояние рамы полувагона с двухслойным настилом пола при ударе в середину хребтовой балки

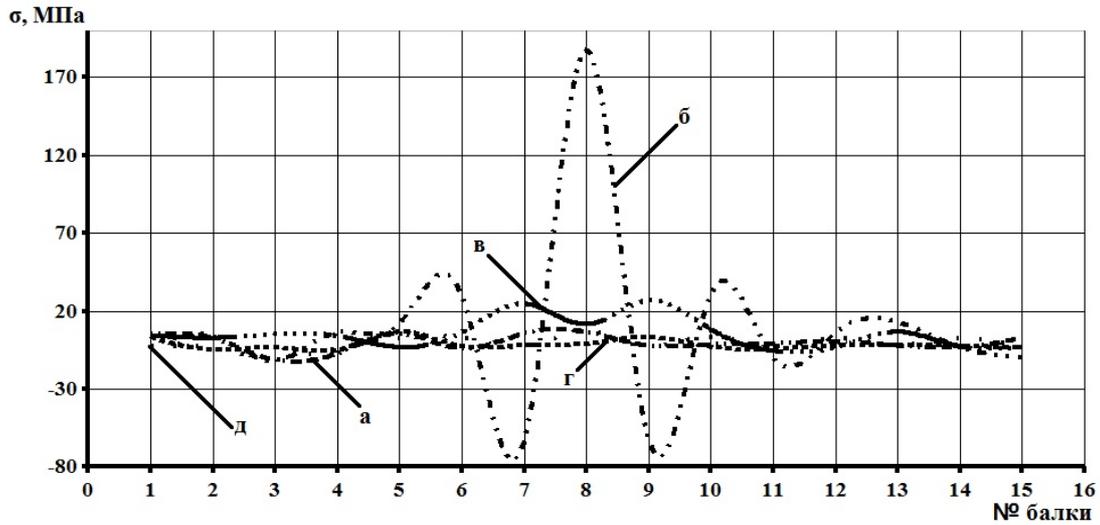
Итогом ударного воздействия на продольную балку, расположенную между шкворневой и первой от нее промежуточной балками, являются напряжение в точке приложения нагрузки, равное 309 МПа (рисунке 5.20).



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 5.20 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы на продольную поддерживающую балку между шкворневой и первой от нее промежуточной балками

При ударном воздействии глыбы на продольную балку между первой и второй промежуточными балками наибольшие напряжения возникают в эпицентре удара и составляют 187 МПа (рисунок 5.21).



а – с хребтовой балкой; б – с ударяемой продольной поддерживающей балкой; в – с ударяемой нижней обвязкой; г – с неударяемой продольной поддерживающей балкой; д – с неударяемой нижней обвязкой

Рисунок 5.21 – Эпюры максимальных динамических напряжений в сечениях узлов соединения поперечных балок рамы при падении глыбы на продольную поддерживающую балку между второй и третьей промежуточными балками

Деформации балок рамы полувагона при падении в него глыбы груза на продольную поддерживающую балку между второй и третьей (промежуточной) балками представлены на рисунке 5.22.

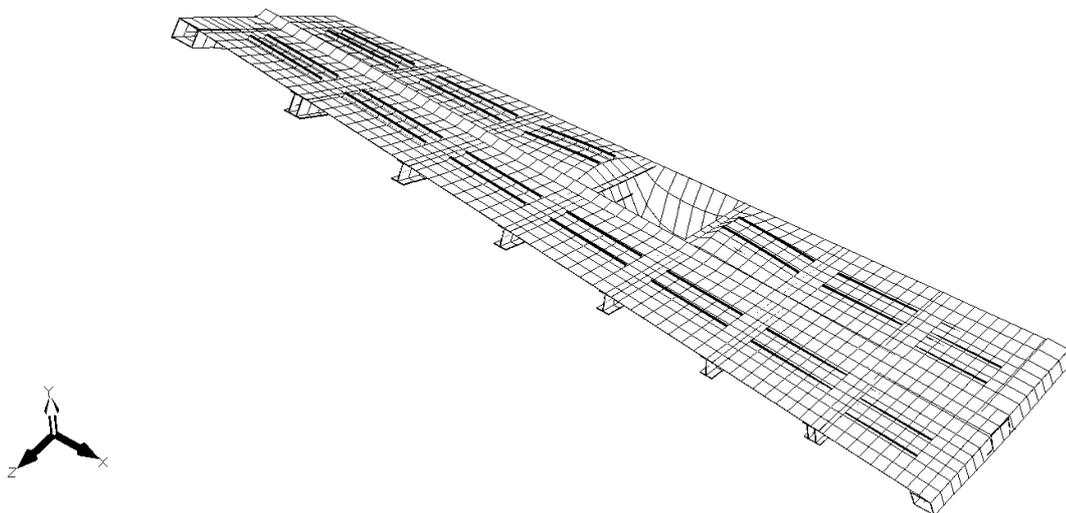


Рисунок 5.22 – Деформированное состояние рамы полувагона с двухслойным настилом пола при падении глыбы груза на продольную поддерживающую балку между второй и третьей (промежуточной) балками

5.7 Первичный расчет устойчивости элементов подкрепления настила пола

Приведенные выше расчеты выявили необходимость дополнительной проверки элементов подкрепления на устойчивость, которая подтвердит способность конструкции воспринимать удар.

Проведены исследования панели, лежащей между соседними поперечными балками, хребтовой балкой и нижней обвязкой, по рекомендаций «Норм ...» [2] и других источников [62, 63] при проверки устойчивости элементов рам грузовых вагонов.

Алгоритм исследований:

- 1) расчет геометрических характеристик элементов подкрепления панели настила пола;
- 2) вычисление критических напряжений;
- 3) определение коэффициента запаса устойчивости;

4) формулировка выводов и разработка рекомендации.

Геометрические характеристики панели рассчитаны по методикам, изложенным в учебниках [63, 75]. по зависимостям:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n F_i}, \quad (5.1)$$

где x_c – координата центра тяжести исследуемого сечения, i -го элемента;

F_i – площадь поперечного сечения i – го элемента;

x_i – координата центра тяжести i – го элемента;

$$J_x = \sum J_i + \sum F_i \cdot x_i^2 - x_c \cdot \sum F_i \cdot x_i, \quad (5.2)$$

где J_x – поперечный момент инерции исследуемого сечения;

J_i – поперечный момент инерции i –го элемента.

Критические напряжения в панели определим по зависимости [62, 63]:

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_x}{l^2 \cdot F}, \quad (5.3)$$

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

E – модуль упругости;

l – расстояние между соседними поперечными балками;

F – площадь поперечного сечения.

Вычисленные критические напряжения в панели по формуле (5.3) сопоставлены с максимальными в эпицентре удара.

Коэффициент запаса устойчивости определим по зависимости [62]:

$$n_{уст} = \frac{\sigma_{кр}}{\sigma_{max}}, \quad (5.4)$$

Результаты проверки вариантов подкрепления настила рамы кузова полувагона сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Проверка устойчивости элементов подкрепления

Варианты подкрепления настила пола кузова полувагона глухого типа	$\sigma_{кр}$, МПа	σ_{max}, МПа	$n_{уст}$
модели 12-1592	976	768	1,3
шестью швеллерами 100х60х5	368	201	1,8
шестью двутаврами № 10	334	223	1,5
четырьмя двутаврами №12	461	297	1,6
составными упругими балками	483	327	1,5
двухслойным настилом пола	1866	308	6

Приведенные в таблице 5.1 данные дают возможность сделать следующие выводы:

- 1) все исследованные элементы подкрепления прошли проверку на устойчивость;
- 2) вариант подкрепления одним двутавром (модель полувагона 12-1592) находится на грани потери устойчивости так, как минимальный коэффициент запаса устойчивости принимают равным 1,2 [2];
- 3) наибольшей устойчивостью обладает двухслойный настил, его коэффициент в 5 раз больше минимального [2].

5.8 Анализ полученных результатов

Результаты исследований пяти вариантов конструкций подкрепления настила рамы сведены в таблицу 5.2, для сопоставления с напряжениями, возникающими при ударах балок полувагона модели 12-1592.

Таблица 5.2 Напряжения в эпицентре ударов, в МПа

Варианты подкрепления настила рамы кузова полувагона глухого типа	Балка, к которой приложена ударная нагрузка			
	первая от шкворневой промежуточная	участок продольной поддерживающей настил пола балки, расположенный между шкворневой и первой от нее промежуточной	участок продольной поддерживающей настил пола балки, расположенный между второй и третьей от шкворневой промежуточными	середина хребтовой
модели 12-1592	65	684	292	48
шестью швеллерами 100х60х5	45	223	137	37,6
шестью двутаврами № 10	58	201,3	128,9	38,8
четырьмя двутаврами №12	43	297	161,2	41,5
составными упругими балками	52	327,3	176,5	39,1
двухслойным настилом пола	112,5	308,52	187,4	39,8

Из приведенных выше в таблице 5.1 данных видно, что значения напряжений в поддерживающих настил пола элементах в предлагаемых вариантах значительно меньше, чем в кузове полувагона модели 12-1592.

При этом подтверждаются общие для кузова глухого типа закономерности нагруженности, полученные при первичных и уточненных расчетах:

Во-первых, чем ближе удар поддерживающего настил рамы элемента к концу кузова, тем больше напряжения в эпицентре удара и выше уровень нагруженности всего кузова.

Во-вторых, разница между напряжениями, полученными при ударах продольной и промежуточной балок, велика, но снизилась с 10–15 раз у вагона модели 12-1592 до 5–6 раз у полувагонов с новыми вариантами подкрепления настила пола.

В-третьих, при ударе первой от шкворневой промежуточной балки у полувагона с двухслойным настилом пола напряжения в эпицентре удара составили 112,5 МПа, а у полувагона модели 12-1592 – 67 МПа. Это можно объяснить тем, что гофры нижнего листа двухслойного настила с поперечными балками рамы не образуют единую крестовину.

В-четвертых, вероятность опрокидывания кузова полувагона при падении глыбы груза массой 500 кг на балки рамы отсутствует, так как перемещения в шкворневой балке не превышают 6 мм, а регламентированный зазор между скользунами кузова и тележки – 9 мм.

В-пятых, перемещения в продольных поддерживающих настил пола элементах выросли по отношению к подкреплению настила полувагона модели 12-1592 на 22,4 %, но при этом эти элементы сохраняют свою устойчивость. Данный факт дает возможность предположить повышение местной гибкости несущей системы рамы при применении новых конструктивных схем подкрепления настила.

В-шестых, максимальные напряжения во всех предложенных вариантах ниже динамического и статического пределов текучести стали 09Г2С.

В-седьмых, при введении новых элементов в конструкцию рамы произойдет увеличение тары полувагона (таблица 5. 3).

Таблица 5.3 – Вес 1 погонного метра поддерживающего элемента

Варианты подкрепления настила рамы кузова полувагона глухого типа	Масса, кг
модели 12-1592	21
шестью швеллерами 100х55х5	27
шестью двутаврами № 10	29
четырьмя двутаврами №12	28

Варианты подкрепления настила рамы кузова полувагона глухого типа	Масса, кг
составными упругими балками	22
двухслойным настилом пола	25

Из приведенных цифр в таблице 5.3, делаем вывод, что происходит увеличение веса одного погонного метра подкрепляющего элемента на 30% по сравнению с весом полувагона модели 12-1592, что даст прибавку к tare вагона 250–340 кг во всех вариантах подкрепления, кроме подкрепления настила рамы составными упругими балками (на 4,5 % меньше).

В-восьмых, предложенные схемы подкрепления настила рамы применимы как для создания новых вагонов, так и для модернизации при капитальном ремонте уже существующих моделей полувагонов.

5.9 Выводы по разделу 5

Проведены исследования подкрепления настила пола рамы: шестью гнутыми швеллерами 100x60x5 мм, шестью двутаврами №10, четырьмя двутаврами №12, составными упругими балками, а также исследования выполнения настила - двухслойным.

Подтвердились закономерности напряженно-деформированного состояния кузова полувагона модели 12-1592, полученные при первичных и уточненных расчетах:

1 При ударах участков продольных поддерживающих элементов напряжения выше, чем участки ближе к концу кузова полувагона.

2 В поперечных балках напряжения в 5–6 раз меньше, чем в продольных поддерживающих, так как удар приходится на крестовину, образованную

продольными и поперечными элементами. Подтверждением этому предположению является численный эксперимент с падением груза на первую от шкворневой промежуточную балку полувагона с двухслойным настилом пола: напряжения в ней достигли 112,5 МПа, а в первых промежуточных балках других схем подкрепления не повышают 55 МПа (таблица 5.2). Этот факт объясняется тем, что гофры нижнего листа двухслойного настила пола не доходят на 70 мм до поперечных балок рамы и не образуют единой крестовины с ними.

3 В варианте подкрепления настила рамы полувагона модели 12-1592 напряжения выше на 30 %, чем в остальных предложенных вариантах, при этом масса одного погонного метра подкрепления возрастает по сравнению базовым на 25 % во всех вариантах подкрепления, кроме подкрепления упругими балками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные выводы и рекомендации по итогам проведенного исследования:

1 Применение пластинчато-стержневых пространственных схем МКЭ кузовов полувагонов не утратило своей актуальности, так как позволяет их использовать при моделировании сложных динамических задач и расхождение результатами расчетов пластинчатой модели, признанных практикой более точными, не превысило 10%.

2 Достоверность результатов, полученных при расчетах, проверена сопоставлением напряжений, возникающих в пластинчато-стержневой модели кузова полувагона и в пластинчатой модели с данными натурных испытаний. Расхождение не привесило 12 %.

3 В качестве основных методик исследования применен расчет на ударную нагрузку кузовов полувагонов с приведением их массы к точке удара и вычислением коэффициента динамичности и численный неявный нелинейный динамический анализ контактной задачи падения глыбы груза в кузов полувагона глухого типа с подкреплением настила рамы двумя продольными двутаврами. При сопоставлении напряжений, возникающих после удара, за эталонные значения был принят динамический предел текучести стали 09Г2С.

4 Для кузова полувагона глухого типа выявлены следующие закономерности [80, 81, 96, 97]:

– чем ближе удар в продольной поддерживающей балке к концу кузова, тем напряжения в ней выше: максимальные напряжения зафиксированы в консольной части кузова, а минимальные в его середине [96];

– напряжения в промежуточных балках в 10–15 раз меньше, чем в серединах продольных поддерживающих настил пола балках, так как удар в них приходится на крестовину, образованную ими и продольными балками рамы [80, 96];

– максимальные напряжения не выходят за область радиусом три метра с центром в точке приложения ударной нагрузки [97];

– наибольшие изгибы балок рамы возникают при падении груза на участки, расположенные между концевой и шкворневой балками, продольных поддерживающих балок [80].

5 Особенности напряженно-деформированного состояния кузова полувагона с разгрузочными люками [94, 95, 97]:

– максимальные напряжения возникают в первой от шкворневой промежуточной балке составляют 364 МПа, а минимальные в шкворневой балке 19 МПа [94];

– перемещения в области скользунов при ударе в шкворневую балку – 6 мм, а по нормативным документам зазор между скользунами грузовой тележки и кузова – 9 мм, поэтому не возникнет реакции сил, ведущих к опрокидыванию кузова (верно для обоих типов полувагонов) [95];

– максимальные напряжения при ударах по первой и второй промежуточным балкам полувагона с разгрузочными люками выше в 4–5 раз, чем кузова глухого типа [97];

– наиболее нагруженной из поперечных балок рамы является первая от шкворневой промежуточная балка [95];

– каркас рамы кузова полувагона глухого типа более восприимчив к ударам падающей глыбы [97].

6 Наиболее прочными являются узлы соединения хребтовых и промежуточных балок для обоих типов кузовов полувагонов и узлы соединения поперечных и продольных балок кузова глухого типа.

7 Напряжения в поперечных балках полувагона с двухслойным настилом пола больше в два раза, чем у вагона модели 12-1592, из-за того что гофр нижнего листа не доходит на 70 мм до них.

8 Во всех предложенных вариантах подкрепления настила пола рамы кузова необходимость учета прогиба упругих элементов тележек не подтвердилась, так

при ударе в шкворневую балку перемещения не превышают 9 мм и не возникнет реакции в скользунах, которая могла бы повернуть кузов полувагона.

9 Перемещения в предложенных вариантах поддерживающих элементах выросли по отношению к базовому на 21,4 %, но при этом они сохраняют свою устойчивость.

10 Максимальные напряжения во всех элементах предлагаемого подкрепления настила пола ниже динамического и статического пределов текучести стали 09Г2С. При этом увеличивается вес одного продольного элемента рамы на 30 %, что приведет к увеличению тары вагона на 250–340 кг.

11 Применение двухслойного настила пола и составных балок возможно не только при изготовлении нового полувагона, но и при модернизации и капитальном ремонте старых вагонов.

12 Закономерности распространения напряжений в несущих элементах кузова полувагона при ударе глыбой справедливы при погрузке не только каменного угля, но и кусков металлолома, контейнеров и других габаритных грузов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 ГОСТ 22235–2010 Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2011. – 32 с.

2 Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]. – М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996.– 319 с.

3 ГОСТ 33211 – 2014 Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – М.: Стандартинформ, 2016. – 87 с.

4 Бейн, Д. Г. Математическое моделирование и оптимизация кузовов полувагонов с несущим полом [Текст]: монография / Д. Г. Бейн, М. А. Булычев; под ред. В. П. Лозбинева. – Брянск: БГТУ, 2014. –185 с.

5 Бейн, Д. Г. Методы проектирования. Проектировочный метод расчета поддерживающей балки рамы полувагона с глухим полом: методические указания к практическим занятиям для студентов всех форм обучения специальности 190302 «Вагоны» [Текст]. - Брянск: БГТУ, 2009.- 11с.

6 Бейн, Д. Г. Расчет поддерживающей балки рамы полувагона с глухим полом на вертикальную нагрузку [Текст]/ Д. Г. Бейн, О. Г. Цветкова// Материалы Региональной научной конференции студентов и аспирантов «Достижения молодых ученых Брянской области»: посвящ. 80-летию Брянского государственного технического университета / под ред. И. А. Лагерева. – Брянск: БГТУ, 2010. – 301 с.

7 Полувагон. [Электронный ресурс] //Википедия.– Режим доступа <https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Полувагон> (дата обращения 17.11.2016).

8 4х-осные полувагоны с деревянной обшивкой [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://scaletrainsclub.com/board/viewtopic.phpf=46&t=7974&p=58884&hilit=Полувагон+с+деревянной+обшивкой#p58884>.(дата обращения 17.11.2016).

9 4-осный полувагон типа Фокс-Арбеля [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://scaletrainsclub.com/board/viewtopic.phpf=46&t=4594&hilit=Фокс+Арбель> (дата обращения 17.11.2016).

10 Шадур, Л. А. Развитие отечественного вагонного парка.[Текст] – М.: Транспорт, 1988.–279 с., ил., табл.

11 Корникова, Т. И. Конкуренция подстегивает производителей [Текст] / Т. И. Корникова, А. Е. Афанасьев// Вагоны и вагонное хозяйство. – М., 2010. – № 2 (38). – С. 6 – 12.

12 Куротченко, И. В. Опыт эксплуатации инновационных вагонов на маршрутах угля СУЭК [Текст]/И. В. Куротченко // Техника железных дорог. – 2015. – № 4 (32). – с. 18 – 26.

13 Демин, К. М. Разработка современного полувагона с улучшенными технико-экономическими показателями [Текст]/ К. М. Демин, С. А. Фёдоров, И. М. Хиллов // Железнодорожный транспорт.– М., 2010. – № 9. – С. 42-47.

14 Полумеры для полувагонов. Производство наиболее массового типа подвижного состава продолжает стагнировать [Текст]/ Транспорт.– М., 2016. – № 3.– С. 36-43.

15 Почиталов, Ю.В. Выбор параметров полувагона из алюминиевых [Текст]/ Ю.В. Почиталов, К.В. Кякк// Вагоны и вагонное хозяйство. – М., 2010. – № 2(38). – С. 40 – 43.

16 Пат. 2010/0101447 США, МКИЗ В 61 D17/00. Gondola rail car with tub floor [Электронный ресурс]/ В. М. Nutt; Progress rail services corp. - 609479; заявлено 29.10.08; опубл. 29.04.09. – Режим доступа: <http://www-faqs.org/patents/app/20100101447> (дата обращения 17.11.2013).

17 Иванов, А. Когда новое лучше, чем хорошо знакомое старое [Текст] / А. Иванов// РЖД партнёр. – М., 2015. – № 19(311) . – С. 58-59.

18 Бороненко, Ю. П. Проблемы и перспективы внедрения инновационных вагонов габарита Т_{пр} [Текст] /Ю. П. Бороненко, Н. А. Атаманчун, М. М. Белгородцева // Вагоны и вагонное хозяйство. – М., 2015. – № 4 (44). – С. 21 – 23.

19 Ковышин, В. М. Остановить массовые повреждения вагонов [Текст]/

- В. М. Ковышин //Вагоны и вагонное хозяйство. – М., 2007. – № 1(9) . – С. 6 – 9.
- 20 Таратуто, В. А. Комплексной подход обеспечит сохранность вагона / В. А. Таратуто //Вагоны и вагонное хозяйство. – М., 2008. – № 1(13). – С. 16 – 17.
- 21 Лукьянов, А . Н. Сохранность вагонного парка: актуальные проблемы [Текст] / А . Н. Лукьянов //Железнодорожной транспорт. – М., 2012. – № 5. – С. 48-51.
- 22 Клавдиенко, О. А. Сохранность вагонного парка: итоги работы в первом полугодии 2015 /О. А. Клавдиенко //Вагоны и вагонное хозяйство. – М., 2015. – № 3(43). – С. 8-9.
- 23 Хусидов, В. Д. Метод расчета цельнометаллического кузова полувагона как комбинированной пластинчато-стержневой системы [Текст]/В. Д. Хусидов, В. Н. Котуранов, К. А. Сергеев.// Труды МИИТа. – Вып. 422, 1973, С. 67 –76.
- 24 Технологическая последовательность экспертных оценок рабочих качеств универсального грузового вагона (на примере полувагона модели 12 – 1000) [Текст]: учеб. пособие для студ. спец. «Вагоны» /В. Н. Котуранов, С. Н. Коржин, И. В. Плотников, Д. В. Коновалов.– М. : МИИТ, 2008. – 103 с. : ил.
- 25 Определение прогибов элементов несущего цельнометаллического кузова восьмиосного полувагона при различных видах его загрузки [Текст]/ В.Н. Котуранов, И. М. Прохоренко, А. Ф. Прибылов: сборник научных трудов; Вып.399: Вопросы совершенствования большегрузных вагонов / Под общ. ред. С. В. Вершинского. – М. : МИИТ, 1972. – 158 с.
- 26 Хусидов, В. Д. Методика прочностного расчета кузовов полувагонов на ПВМ [Текст]/ В. Д. Хусидов, Л. В. Заславский, В. В. Хусидов, Чан Фу Тхуан. // Вестник ВНИИЖТ, 1995. –№5. – С. 22 – 26.
- 27 Хусидов, В. Д. Анализ напряженно-деформированного состояния различных конструктивных схем рамы восьмиосного полувагона [Текст]./ В. Д. Хусидов, К. А. Сергеев, Г. С. Егоров: Труды МИИТа. – Вып. 530.– М. – 1976. – С. 46 – 51.
- 28 Битюцкий, А. А. Анализ напряженного состояния и совершенствование конструкций соединений несущих элементов кузова полувагона [Текст]: дис. на

соиск. уч. степ, к.т.н.: 05.22.07 / Александр Анатольевич Битюцкий. – Л.: ЛИИЖТ, 1983. – 183 с.

29 Битюцкий, А. А. Выбор и обоснование основных параметров универсального полувагона/ А.А. Битюцкий, К. В. Кякк, Д. Е. Клушанцев и др. // Отчет о НИР (заключительный) / «Инженерный центр ОВС». – СПб, 2005. - 127 с.

30 Битюцкий, А. А. Разработка технико-экономического обоснования создания нового полувагона с осевой нагрузкой 25,0 тс / А.А. Битюцкий, К. В. Кякк, С. А. Федоров и др. // Отчет о НИР (заключительный) / «Инженерный центр ОВС». – СПб, 2011. – 131 с.

31 Исследование напряженного состояния конструкции заделки шкворневой стойки кузова 4-х осного полувагона. Отчет о НИР (заключительный), № ГР 01840040850 / рук. работ Битюцкий А. А. – Л.: ЛИИЖТ. – 1984. – 99 с.

32 Галиев, И. И. Сравнительная оценка динамической нагруженности полувагона с разными типами тележек (18-100 и 18-9810) [Текст]/ И. И. Галиев, О. В. Гателюк, Д. Ю. Лукс, В. Н. Ушак // Известия Транссиба. – Омск: ОмГУПС– 2015. – №4(24). – С. 95 – 103.

33 Черняк, И.Э. Параметры и динамические характеристики большегрузных полувагонов перспективной структуры парка [Текст]: автореф. дис. на соиск. уч. степ. к.т.н.: 05.22.07/ Игорь Эмильевич Черняк. – М.: МИИТ, 1992. – 24 с.

34 Ефимов, В. П. Исследование динамических качеств полувагона с глухим скругленным низом кузова [Текст]/ В. П. Ефимов, А. Э. Павлюков, В. А. Ивашов, С. В. Васильев //Подвижной состав 21 века идеи, требования, проекты. Сб. научн. статей/ Санкт-Петербург: ПГУПС.– 2000.– С. 106 - 114.

35 Складов, В. М. Повышение работоспособности стоек полувагонов на основе оценки прочности в зонах концентраторов [Текст]: автореф. дис. на соиск. уч. степ, к.т.н.: 05.22.07/ В. М. Складов.– М.: МИИТ, 1989. – 23 с.

36 Ле, В. Х. Напряженное состояние кузовов полувагонов железных дорог СРВ с учетом влияния коррозионных износов их элементов [Текст]: автореф. дис. на соиск. уч. степ, к.т.н.: 05.22.07/ В. Х. Ле. – М.: МИИТ, 1991. – 24 с.

37 Ултургашев, Г. Г. Влияние технологических допусков сборки на напряженное состояние несущих элементов кузова полувагона [Текст]: автореф. дис. на соиск. уч. степ, к.т.н.: 05.22.07 / Г. Г. Ултургашев. – М.: МИИТ, 1990. – 19 с.: ил.

38 Ерыгин, В. И. Совершенствование технологии сварки узла кузова полувагона для повышения его работоспособности [Текст]: автореф. дис. на соиск. уч. степ, к.т.н.: 05.03.06/ В. И. Ерыгин. – Челябинск.: Челябинский политехнический институт, 1988. – 183 с.: ил.

39 Богачев, А. Ю. Совершенствование сварных узлов полувагона на основе поэтапных конечно-элементных расчетов их нагруженности [Текст]: автореф. дис. на соиск. уч. степ, к.т.н.: 05.22.07 / А. Ю. Богачев. – М.: МГУПС, 1995. – 24 с.

40 Красников, В. К. Исследование вибронапряжений несущих стержневых элементов [Текст] / В. К. Красников // Вагоны и вагонное хозяйство. – М., 2009. – № 2 (18). – С. 6 – 9.

41 Стулишайко, И.Г. Исследование причин разрушения поперечных балок полувагона: труды ВНИИВ. – М,1966. – Вып.1. – С.56-61.

42 Зайнетдинов, Р. И. Разработка методики оценки несущей способности и надежности сварных соединений шкворневого узла четырехосного полувагона [Текст]: автореф. дис. на соиск. уч. степ, к.т.н.: 05.22.07 / Р. И. Зайнетдинов. – М.: МИИТ. – 1984. – 24 с.

43 Дубровин, В.Г. Исследование напряженного состояния крышек разгрузочных люков полувагонов: труды ВНИИЖТ Уральское отделение. - Екатеринбург, 1965. – Вып. 10. – С. 76-83.

44 Путьято, А. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния крышки люка полувагона при воздействии ударных нагрузок [Текст]/ А. В. Путьято, О. И. Якубович //Современные технологии. системный анализ. Моделирование. – Иркутск, 2011. – №2. – С. 179-185.

45 Долгих, К. О. Нагруженность кузова полувагона при воздействии накладных вибромашин. [Текст]: дис. к. т. н. : 05.22.07 / К. О. Долгих; [Место защиты: Петерб. гос. ун-т путей сообщ.].– Екатеринбург, 2013.– 148 с.:

46 Долгих. К. О. Совершенствование конструкции кузова полувагона из условия обеспечения сохранности при виброразгрузке [Текст] / К. О. Долгих, В. Ф. Лапшин // Транспорт Урала. – Екатеринбург, 2013. – С. 54–59

47 Гребцов, А. И. Разработка способа очистки полувагонов от остатков сыпучих грузов навесными воздуходушными устройствами [Текст] : автореф. дис. на соиск. уч. степ, к.т.н.: 05.22. 08 /А. И. Гребцов. – ВНИИЖТ.– М., 1990.– 21 с.: ил.

48 Афанасьев, И.А. Упрощенный метод расчета кузова полувагона при действии распорных усилий [Текст] // Автоматизация и современные технологии. – М.,1999. – №4. – С.22–24.

49 Нетеса, А.Г. Совершенствование методики расчета полувагонов на силы инерции [Текст] // Повышение надежности и совершенствование текущего обслуживания грузовых вагонов: труды ВНИИЖТ. – М., 1978. – Вып. 587. – С. 12-19.

50 Заславский, Л. В. Нагруженность кузовов полувагонов при продольных ударах [Текст]: автореф. дис. на соиск. уч. степ, к.т.н.: 05.22.07 / Ленид Владимирович Заславский. – М.: МИИТ. – 1993. – 23 с.: ил.

51 Никольский, Л. Н. Амортизаторы удара подвижного состава [Текст] / Л. Н. Никольский, Б. Г. Кеглин. – М.: Машиностроение, 1986 г. - 144 с.

52 Болдырев, А. П. Расчет и проектирование амортизаторов удара подвижного состава [Текст]/ А. П. Болдырев, Б. Г. Кеглин. – М.: изд – во «Машиностроение –1», 2004. – 199 с.

53 Андриянов, С. С. Нагруженность элементов специализированных вагонов, оборудованных амортизаторами повышенной энергоёмкости [Текст]: а автореф. дис. на соиск. уч. степ, к.т.н.: 05.22.07/ С. С. Андриянов. – Москва, МИИТ, 2006. – 24 с.

54 Стулишайко, И. Г. Усталостные испытания узлов крепления стоек кузова полувагона [Текст] // Транспортное оборудование. – М.: ЦНИИТЭИ ТЯЖМАШ, 1982. вып.5. – №18. – С. 18 – 19.

55 Сурвилло, А. Б. Перспективные конструкции шкворневых узлов полувагонов [Текст] /А. Б. Сурвилло, В. И. Гамиров: труды ВНИИЖТ Уральское отделение. – Екатеринбург, 1969. – Вып. 15. – С. 27–38.

56 Хилов, И. А. Совершенствование конструкции кузова специализированного полувагона [Текст]: автореф. дис. на соиск. уч. степ, к.т.н.: 05.22.07 / Иван Андреевич Хилов. – СПб. : СР ПГУПС, 2012. – 16 с. : ил.

57 Кузнецов, С. А. Нагруженность заделок стоек кузовов полувагонов с учетом коррозионного износа [Текст]: автореф. дис. на соиск. уч. степ, к.т.н: 05.22.07 / С. А. Кузнецов. – Екатеринбург: УрГУПС, 2005. – 23 с.

58 Лукин, В. В. Конструирование и расчет вагонов [Текст] / В. В. Лукин, Л. А. Шадур, В. Н. Котуранов, А. А. Хохлов, П. С. Анисимов / Под ред. В. В. Лукина. – М.: УМК МПС России, 2000. – 731 с.

59 Шадур, Л. А. Вагоны. Конструкция, теория и расчет [Текст] / Под. ред. Л. А. Шадура. – М.: Транспорт, 1980. – 222 с.

60 Азовский, А. П. Вагоны. Основы конструирования и экспертизы технических решений [Текст]: учебное пособие для вузов ж.– д. транспорта / А. П. Азовский, Е. В. Александров, В. В. Кобищанов, В. Н. Котуранов, В. П. Лозбинев, М. Н. Овечников, Б. Н. Покровский, В. И. Светлов, А. А. Юхневский; под ред. В. Н. Котуранова. – М.: Маршрут, 2005. – 490 с.

61 Никольский, Е. Н. Развитие оптимизационных расчетов кузовов вагонов на базе метода чередования основных систем [Текст]/ Е.Н. Никольский // Автоматизация расчетов прочности грузовых вагонов. – М.: ЦНИИ-ТЭИтяжмаш, 1985. – Сер.5. – Вып. 10. – С. 1-2.

62 Кобищанов, В.В. Механика вагонов [Текст]: учебное пособие / В.В Кобищанов, В.П Лозбинев; под ред. В.П. Лозбинева. – Брянск: БГТУ, 2008. - 162 с.

63 Лозбинев, В. П. Проектировочные расчеты для проверки несущих способностей кузовов вагонов [Текст]: учеб. пособие/ В. П. Лозбинев, А. А. Лагутина. – Брянск: БГТУ, 2010. – 103 с.

64 Никольский, Е. Н. Расчет несущих конструкций по методу конечных элементов [Текст]/ Е. Н. Никольский. – Брянск: БИТМ, 1982. – 99 с.

65 Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация [Текст]./О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986.– 318с.

66 Кобищанов, В. В. Расчет кузовов вагонов по частям на основе метода конечных элементов [Текст]/В. В. Кобищанов, Е. А.Холохонова //Транспортное машиностроение. – М.: ЦНИИТЭИ ТЯЖМАШ, 1991. – Вып. 2. – С. 3 – 6.

67 Смольянинов, А. В. Основы метода конечных элементов и его применение к расчету вагонных конструкций [Текст]: учеб. пособие. – Екатеринбург: 1996. – Ч. 1 – 37 с.

68 Морозов, Е. М. Контактные задачи механики разрушения[Текст] / Е. М. Морозов, М. В. Зернин. – 2-е изд. – М.: ЛИБРОКОМ, 2010. – 544 с.

69 Сакало, В. И. Контактные задачи железнодорожного транспорта [Текст] / В. И Сакало, В. С.. Коссов.– М.: Машиностроение, 2004. – 496 с.

70 Бабин, А. П. Конечноэлементный алгоритм решения контактных задач с учетом нелинейных эффектов [Текст] /А. П. Бабин// Динамика, прочность и надежность транспортных машин. - Брянск: БГТУ, 2002. С. - 138-148.

71 Пат. 2273575 РФ, МПК⁷ В 61 D3/00 В61 D 17/00. Кузов железнодорожного полувагона с глухим полом [Электронный ресурс]/ Омеляненко И. А., Приходько В. И., Прохоров В. М. и др.; заявитель и патентообладатель ОАО «КВСЗ». – № 2004114034/11; заявл. 01.01.00; опубл. 10.04.06, Бюл. № 16. – Режим доступа:<http://bd.patent.su/2391000-2391999/pat/servlet050.html>/(дата обращения 17.11.2015)

72 Пат. 2391239 РФ, МПК⁷ В61D3/00, В61F1/00.Грузовой полувагон с глухим полом [Электронный ресурс]/Ю. В. Мещерин, В. Ю. Гусев, Н. Ф. Красюков и др.; заявитель и патентообладатель ОАО «РЖД». – № 200911920/11; заявл. 21.05.09; опубл. 10.06.10, Бюл. № 16. – Режим доступа:<http://bd.patent.su/2391000-2391999/pat/servlet7163.html>/(дата обращения 17.11.2015)

73 Пат. 2184667 РФ, МПК⁷ В61D3/00, В61D7/16. Железнодорожный полувагон [Электронный ресурс]/Крючков А.В.; Герман В.П.; Малых Н.А.; Андронов В.А. и др.; заявитель и патентообладатель ГУП «По Уралвагонзавод» им. Ф. Э. Дзержинского. – № 2000118652/28; заявл. 12.07.00; опубл. 10.07.02, Бюл. № 16. – Режим доступа:<http://bd.patent.su/2391000-2391999/pat/servlet2207.html>/(дата обращения 17.11.2015)

74 Пат. 2010/00011987 США, МКИЗ В 61 D17/00. Railroad gondola car structure [Электронный ресурс]/ J. W. Forbes; National steel car limited. - 177106; заявлено 21.07.08; опубл. 21.01.10. – Режим доступа: <http://www-faqs.org/patents/app/201000011987> (дата обращения 17.11.2013).

75 Сакало, В.И. Сопротивление материалов: учебное пособие / В. И. Сакало. – Брянск: БГТУ, 2009. – 528 с.: ил.

76 Миролюбов, И.Н. Пособие к решению задач по сопротивлению материалов [Текст]/ И.Н. Миролюбов, С.А. Енгальчев, Н. Д.Сергиевский и др. – М.: Высшая школа, 1985. – 400 с.

77 Шимкович, Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows [Текст]/Д.Г. Шимкович. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.

78 Полувагон с глухим кузовом мод. 12-1592 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vagon.by/model/12-1592> (дата обращения: 21.10.2012).

79 Реутов, А. А. Компьютерные технологии машиностроения. Расчет напряжений и деформаций стержневых конструкций с использованием программы FEMAP [Текст]+[Электронный ресурс]: методические указания к выполнению лабораторной работы для студентов очной и заочной форм обучения специальности 190109 «Наземные транспортно-технологические средства». – Брянск: БГТУ, 2012. – 10 с.

80 Gerasimov, K. V. Modeling cargo block falling into the body of blind open-top wagon [Electronic resource] \ K. V. Gerasimov, V. V. Kobischanov \ IX International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, «MEANS-2015». – Tomsk, 2015. – 4 с. – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7414940/> (дата обращения: 23.10.2015).

81 Герасимов, К. В. О нагруженности кузова полувагона.[Текст] /К. В. Герасимов, Д. Ю. Расин// Железнодорожный транспорт России. – М., 2016– №7. – С. 67

82 Огородников, В. А. Прочность некоторых марок стали и армко-железа при ударно-волновом сжатии и разгрузке в области давлений 2-200 Гпа[Текст]/

В. А. Огородников, Е. Ю. Боровков, С. В. Ерунов// Физика горения и взрыва. – Новосибирск, 2004 – № 5. – С. 109 – 117.

83 Вайнберг, Д. В. Расчет пластин / Д. В. Вайнберг, Д. Е. Вайнберг. – Киев.: Будівельник, 1970. – 436 с.

84 Гончаров, П. С. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ [Текст]/ П. С. Гончаров, И. А. Артамонов, Т. Ф. Халитов, С. В. Денисихин, Д. Т. Сотник /. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 504 с.: ил.

85 Хоником Р. Пластическая деформация металлов. Пер. с англ.; под ред. Любова Б. Я. – М.: Мир. – 1972. – 408 с.

86 Duntas, G. Elastoplastic indentation of a heelf-spase by an infinitely loing reqod circuleer cylinder/ G. Duntas, С. Т. Baronet// Int. J.Mach. Sciens. – 1971. – Vol.13 – P. 519-530.

87 Биргер, И. А. Сопротивление материалов: учебное пособие./И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. Лит. – 1986.–560 с.

88 Отчет по результатам испытаний на статическую прочность: «Полувагона с глухим кузовом модели 12-9833». – ООО «ИЦПС». – Спб., 2012. – 32 с.

89 Герасимов, К.В. Методика расчета кузова полувагона глухого типа при падении в него глыбы груза на основе пластинчатой модели МКЭ/К. В. Герасимов, Д. Ю. Расин //Материалы VII всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы вагоностроения» – Брянск, БГТУ.– 2016.– С. 44–45.

90 Яблонский, А. А. Курс теоретической механики. Часть I. Статика. Кинематика [Текст]/ А. А. Яблонский, В. М. Никифорова.– изд. 3 пер. и доп.–М.: Высшая школа. – 1966. – 439 с.

91 Реальный удар [Электронный ресурс]/Википедия.–Режим доступа [https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Реальный удар](https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Реальный_удар) (дата обращения: 23.04.2015).

92 Скорости распространения ультразвуковых волн в различных материалах [Электронный ресурс]. – <http://www.ntcexpert.ru/component/content/article?id=589:skorosti-rasprostraneniya-ultrazvukovyh-voln-razlichnyh-materialah> (дата обращения: 23.04.2015).

93 Полувагон мод. 12-783 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vagon.by/model/12-783/106> (дата обращения: 21.10.2013).

94 Герасимов, К. В. Анализ нагруженно-деформированного состояния кузова полувагона с люками при падении в него глыбы груза [Текст] / К. В. Герасимов, В. В. Кобищанов, Д. Ю. Расин // Вестник БГТУ. – 2014. – №4(44). – С. 8 – 11.

95 Герасимов, К.В. Нагруженность рам кузовов полувагонов при падении в них глыбы груза/К. В. Герасимов, Кобищанов В. В., Расин Д. Ю. //Материалы V всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы вагоностроения»– Брянск, БГТУ.– 2014.– С. 80–81.

96 Герасимов, К. В. Нагруженность полувагона с настилом при погрузочно-разгрузочных работах [Текст]/ К. В. Герасимов, В. В. Кобищанов, Д. Ю. Расин // Вестник БГТУ. – 2015.– №4(48). – С. 45– 49.

97 Герасимов, К. В. Особенности нагруженности рам кузовов полувагонов при ударе грузом/Вестник РГУПС. – Ростов-на-Дону. – 2016. – №2 (62). – С. 19–23.

98 6. Конструкция кузовов современных крытых вагонов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.studfiles.ru/preview/5943938/page:5/> (дата обращения: 17.05.2014)

99 Селинов В.И. Проектирование подвешивания вагонов [Текст]: учеб. пособие. - Брянск: БГТУ, 1999.- 251 с.

100 Пат. полз. модель 162477 РФ. МПК В61D3/00 В61D17/10 В 61 F1/14 Полувагон с составными упругими балками рамы [Текст]/ В. П. Лозбинева, К. В. Герасимов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО БГТУ. – № 2015146276/11; заявл. 27.10.15; опубл. 10.06.16, Бюл. № 16.– 3 с.

101 Пат. полз. модель 116817 РФ МПК В 61 В 3/00. Кузов полувагона с металлическим настилом пола[Текст]/ В. П. Лозбинева, К. В. Герасимов, Б. А. Лисичкин, Д. С. Петрачкова. – № 2012103877/11; заявл. 03.02.2012; опубл. 10.06.2012, Бюл. № 16.– 4 с.