

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный университет путей сообщения»
МГУПС (МИИТ)

На правах рукописи

Попов Виталий Борисович

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
КОНЦЕПЦИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ВАГОНА МЕТРОПОЛИТЕНА
СОВРЕМЕННОГО МЕГАПОЛИСА**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, профессор
Пузанков Александр Дмитриевич

Москва – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 Анализ состояния проблемы и обоснование программы исследования	13
1.1 Развернутая постановка проблемы в практической сфере деятельности, связанной с рамами тележек вагонов метро	13
1.2 Обзор и анализ работ по исследованию рам тележек	20
1.3 Обоснование программы и методы исследования	26
ГЛАВА 2 Эволюция конструкций рам тележек вагонов отечественного метрополитена	32
2.1 Парк подвижного состава отечественного метрополитена	32
2.2 Конструктивные исполнения рам тележек и их прочностной анализ	40
2.3 Построение статистических моделей и определение показателей надежности рам тележек вагонов Московского метрополитена	60
2.4 Результаты эксплуатации рам тележек на метрополитенах России	66
2.5 Основные закономерности эволюции рам тележек и анализ современного состояния	69
ГЛАВА 3 Построение конечно-элементной модели и разработка новой конструкции рамы тележки вагона метрополитена современного мегаполиса	72
3.1 Обоснование концепции нового проектирования	72
3.2 Разработка новой конструкции тележки и рамы тележки	78
3.3 Основные положения и математическая сущность метода конечных элементов	82
3.4 Конечно-элементная модель новой рамы тележки	91
3.5 Прочностной и конструкторско-технологический анализ новой конструкции рамы тележки	114

ГЛАВА 4 Экспериментальные исследования новой конструкции рамы тележки	122
4.1 Усталостные (стендовые вибрационные) испытания рамы тележки	122
4.2 Дополнительные стендовые вибрационные испытания кронштейнов подвешивания редуктора рамы тележки	131
4.3 Ходовые динамико-прочностные испытания опытных вагонов метрополитена с тележками, оборудованными новыми рамами	134
ГЛАВА 5 Расчет полезного экономического эффекта от внедрения и эксплуатации вагонов и тележек с новыми рамами	138
5.1 Методика расчета и определение исходных данных	138
5.2 Расчет стоимости жизненного цикла	141
5.3 Расчет экономического эффекта	147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ	151
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	157
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	159
СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА	171
ПРИЛОЖЕНИЯ	175
Приложение А – Определение вида законов распределения наработки рам тележек до отказа	175
Приложение Б – Основные узлы новой рамы тележки	180
Приложение В – Расчет новой конструкции рамы тележки	181

ВВЕДЕНИЕ

Реальностью современной России стало резкое возрастание пассажиропотоков в крупных городах. Имеющиеся городские транспортные системы с большим трудом выполняют поставленные перед ними задачи по своевременному, безопасному и комфортабельному перемещению миллионов пассажиров. Одним из основных видов городского транспорта Москвы, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Самары, Екатеринбурга, Новосибирска, Казани является метрополитен. Именно метрополитену, как городской внеуличной дороге, не имеющей проблем перегруженных улиц, отводится в этих самых крупных городах России ведущая роль по обеспечению массовых пассажирских перевозок.

Однако, одной из специфических особенностей метрополитенов являются повышенные по сравнению с наземным транспортом требования к надежности подвижного состава, обусловленные тоннельным движением поездов с минимальными интервалами в условиях слабого путевого развития. Другими словами, любой отказ, то есть событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния вагона метрополитена, может привести к срыву графика движения одной линии, а при тяжких последствиях нарушить работу всего метрополитена и транспортной системы города.

Таким образом, важнейшей характеристикой подвижного состава метрополитена являются показатели надежности, прежде всего безотказность. В настоящий момент на метрополитенах России и ближнего зарубежья, эксплуатирующих электропоезда отечественного производства, одним из наименее надежных узлов в конструкции вагонов старых серий являются рамы тележек. Например, на Московском метрополитене за период 2010 года при наличии инвентарного парка 6930 рам тележек вагонов старых серий списано из эксплуатации по техническому состоянию 473 рамы тележки. За этот же период произведен ремонт 1263 рам тележек.

На рисунке 1 приведена фотография тележки вагона метрополитена с усталостной трещиной рамы.

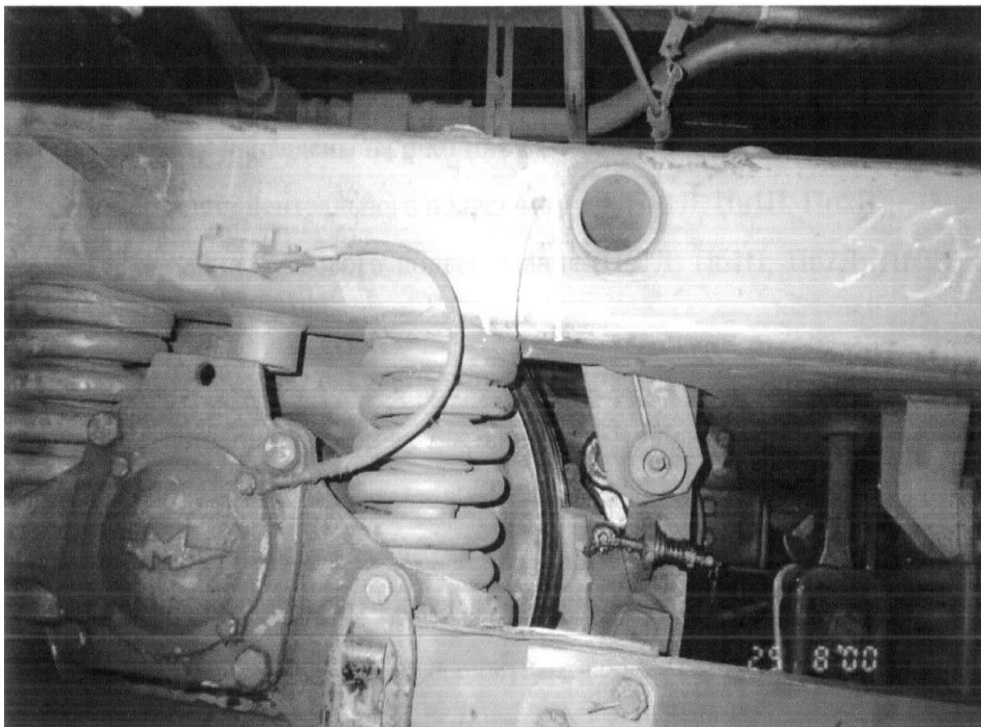


Рисунок 1 – Трещинообразование рамы тележки вагона метрополитена серии 81-714.5 (трещина на продольной балке рамы в зоне средней шпинтонной втулки)

У вагонов новых моделей («Яуза» и «Русич») при достаточно надежной конструкции рам тележек недостаточно надежен ряд других узлов тележек, например редукторный узел и узел подвешивания тягового привода, кроме того выявляются технико-экономические проблемы, связанные с большими затратами на обслуживание и ремонт. При этом является очевидным, что проведение серьезной модернизации тележки невозможно без изменения или, по крайней мере, глубокого анализа основного несущего узла тележки – ее рамы.

Недостаточная надежность тележек и рам тележек существенно влияет:

- на безопасность движения поездов;
- на технико-экономическую ситуацию на метрополитенах, в связи с большими затратами на ремонт и на изготовление новых узлов взамен списанных из эксплуатации.

Кроме того, необходимо отметить следующее. На метрополитенах России и ближнего зарубежья находится в эксплуатации относительно большое количество серий и моделей вагонов, имеющих невзаимозаменяемые ходовые части. При этом имеющийся парк вагонов существенно стареет. В соответствии с назна-

ченным сроком службы вагонов в 31 год, на Московском метрополитене выработали свой ресурс и подлежат списанию 627 вагонов модификаций серии «Е» (по состоянию на 2011-01-01). С 2009 года и последующих лет подлежат списанию партии вагонов серий 81-717 и 81-714, изготовленных с 1978 года. Тяжелая экономическая ситуация не позволяет администрациям городов, в ведении которых находятся метрополитены, производить списание всех вагонов, выработавших ресурс, тем не менее старые вагоны постепенно списываются из эксплуатации.

С другой стороны, объемы перевозок продолжают увеличиваться, что требует постоянного увеличения имеющегося парка вагонов. Также необходимо учитывать постоянное расширение метрополитенов в связи со строительством новых линий. Кроме того, сегодняшняя ситуация определяет несколько иные требования к вагонам метрополитена в целом. Это обусловлено более высокой загрузкой вагонов пассажирами, требованием повысить показатели надежности, высокой интенсивностью движения, изменяющимися требованиями по комфортности и безопасности пассажиров. Существующие конструкции, в том числе вагоны новых моделей «Яуза» и «Русич», в полной мере новым требованиям не соответствуют. Поэтому в настоящее время профильные машиностроительные предприятия и метрополитены заняты выбором дальнейшего пути проектирования перспективных вагонов метрополитена для качественного выполнения пассажирских перевозок в тяжелых условиях эксплуатации современных мегаполисов. В связи с этим требуется научное обоснование концепции проектирования ходовых частей для перспективных вагонов метрополитена, в том числе рам тележек, соответствующих условиям эксплуатации метрополитенов современных мегаполисов.

Существенное значение имеет технико-политическая ситуация, сложившаяся в данный момент на метрополитенах и в метровагоностроении. После выхода метрополитенов из состава МПС (указ Верховного Совета России № 3020-1 от 1991-12-27 об отнесении метрополитенов к муниципальной собственности) в России отсутствуют единые работы по научному анализу и исследованиям в области подвижного состава метрополитенов, выполняемые ранее железнодорож-

ными научно-исследовательскими учреждениями. Техническая политика в области эксплуатации и проектирования подвижного состава метрополитенов также осуществляется в данный момент без единого скоординированного и жестко контролируемого плана. Другими словами вся информация по эксплуатации вагонов метрополитена, включая информацию по рамам тележек, начиная с начала 1990-х годов, научно не обработана и не систематизирована. При этом накоплена новая информация не только по вагонам метро старых конструкций, но и новых моделей. Так в 1998 году на Московском метрополитене введены в эксплуатацию вагоны метро нового поколения – моделей 81-720 и 81-721 («Яуза»), а в 2004 году – вагоны моделей 81-740 и 81-741 («Русич»).

Кроме того, необходимо отметить, что отечественное метровагоностроение сформировало и продолжает формировать парк подвижного состава не только метрополитенов России, но и ряда метрополитенов ближнего и дальнего зарубежья: Киева, Харькова, Днепропетровска, Минска, Баку, Тбилиси, Еревана, Ташкента, Будапешта, Праги, Софии, Варшавы.

В связи с изложенным, работа по исследованию существующих конструкций рам тележек вагонов метрополитена и научному обоснованию их перспективного развития является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам рационального конструирования рам тележек рельсового подвижного состава, оценке их прочности и надежности посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых. Вместе с тем, вопросы обоснования концептуального развития рам тележек вагонов метрополитена в изменившихся условиях эксплуатации современных мегаполисов России, системного прочностного анализа многочисленных конструктивных исполнений, включая вагоны новых моделей, разработаны явно недостаточно. Причины этого, заключаются, очевидно, в том, что основные исследования рам тележек вагонов метрополитена были проведены относительно давно и сосредоточены на изучении отдельных (локальных) узлов рам тележек вагонов старых серий. Обзор и анализ выполненных ранее работ приведен в параграфе 1.2 настоящей диссертации.

Целью настоящей работы является обоснование и разработка концепции и технических решений при проектировании рамы тележки для перспективных вагонов метрополитена современных мегаполисов.

Для достижения заявленных целей поставлены следующие задачи:

- исследовать закономерности развития конструкций рам тележек вагонов метрополитена за период с начала 1960-х годов (время разработки основных технических решений, действующих в настоящее время для некоторых конструктивных исполнений) с целью прогнозирования их дальнейшей эволюции;
- исследовать современное техническое состояние рам тележек на различных метрополитенах страны, исходя из условий эксплуатации;
- разработать статистические модели и определить параметры надежности рам тележек;
- обосновать концепцию и разработать основные технические решения проектирования рамы тележки для метровагонов современных мегаполисов;
- разработать математическую модель новой конструкции рамы тележки и выполнить ее теоретическое исследование на предмет соответствия требуемым прочностным нормам;
- выполнить экспериментальную проверку результатов теоретических исследований путем проведения стендовых вибрационных и ходовых динамико-прочностных испытаний новой конструкции рамы тележки;
- разработать методику технико-экономического расчета подвижного состава метрополитенов и выполнить технико-экономическое обоснование новой конструкции рамы тележки.

Предметом исследования являются рамы тележек вагонов метрополитена.

Объектом исследования являются конструкторско-прочностные и надежные характеристики рам тележек вагонов метрополитена.

Теоретическую основу исследования составляют научные работы отечественных и зарубежных авторов в области локомотиво- и вагоностроения, теории надежности машин и механизмов, прочности и конструирования сварных конструкций, экономики производства и транспорта.

Научная новизна исследования. Проведены исследования, связанные с изучением особенностей эксплуатации на метрополитенах современных мегаполисов России, собрана и систематизирована информация по отказам рам тележек и эксплуатационным характеристикам, выявлена степень нагруженности различных метрополитенов применительно к предмету исследования.

Проведен комплексный конструкторско-прочностной анализ рам тележек вагонов отечественных метрополитенов, выявлены наиболее типичные конструкторско-прочностные характеристики пяти групп рам тележек, выделенных по существенным признакам по результатам классификации многочисленных конструктивных исполнений.

Подобраны статистические модели, позволяющие прогнозировать показатели надежности рам тележек метровагонов старых серий, прежде всего вероятность их безотказной работы в зависимости от наработки, для условий эксплуатации Московского метрополитена.

Разработана математическая модель для выполнения комплекса теоретических исследований рамы тележки новой конструкции. В результате многовариантных расчетов выбраны рациональные геометрические параметры сечений балок рамы тележки, обеспечивающие требуемые прочностные характеристики при наиболее невыгодном возможном сочетании одновременно действующих режимов нагружения. Дано теоретическое обоснование новых для отечественного метровагоностроения технических решений.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

- эксплуатация рамы тележки новой конструкции (чертеж 7600.31.20.010) началась в 2012 году на Московском метрополитене в составе тележек вагонов новых моделей 81-760, 81-761, возможна эксплуатация этих вагонов на других метрополитенах России и зарубежья;

- часть результатов работы использована в разработанном нормативно-техническом документе – инструкции по эксплуатации, освидетельствованию и ремонту листовых рам тележек вагонов метрополитена [36], внедренной на Московском метрополитене в 2012 году;

- разработанная методика определения показателей технико-экономической эффективности подвижного состава и других сложных техниче-

ских систем метрополитенов [56] может быть использована профильными предприятиями и организациями в качестве типовой методики технико-экономических расчетов;

- результаты исследования, прежде всего в части рассматриваемой методики конструирования рациональных сечений балок, могут быть использованы проектно-исследовательскими и конструкторскими организациями при разработке и модернизации подвижного состава железных дорог и метрополитенов.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в качестве методов исследования применялись:

- при анализе существующих конструкций методы математической статистики, теории надежности, теории вероятностей;

- при проведении прочностных расчетов физическое и математическое моделирование с использованием программного комплекса ANSYS с построением конечно-элементных моделей;

- при разработке концепции проектирования и технических решений методика конструирования, принятая в общем и транспортном машиностроении, с учетом требований государственных стандартов и других нормативно-технических документов;

- при проектировании метод трехмерного моделирования с использованием программного комплекса Solid Works;

- при экспериментальных исследованиях натурального образца (опытной рамы тележки) тензометрирование и усталостные (вибрационные стендовые) испытания на базе 10 млн циклов нагружения;

- при экспериментальных исследованиях опытного электропоезда тензометрирование и динамико-прочностные ходовые испытания.

Информационная база исследования:

- научные данные из книг и журналов;

- официальные документы в виде государственных и отраслевых стандартов, технических условий, норм, инструкций, указаний, правил;

- материалы метрополитенов России, международной Ассоциации «Метро», машиностроительных и ремонтных заводов, научно-исследовательских институтов (конструкторская документация, результаты исследований и испытаний, отчеты, акты и другие документы);

- материалы СКБ ОАО «Метровагонмаш» (г. Мытищи), чьим сотрудником является диссертант;

- результаты собственных исследований и расчетов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- выполненные методами математической статистики расчеты определяют виды законов распределения наработки на отказ для трех групп рам тележек вагонов Московского метрополитена;

- установленные показатели надежности одинаковых конструктивных исполнений рам тележек на «малых» и столичных метрополитенах России находятся в тесной связи с разными условиями эксплуатации, что указывает на сильное выделение метрополитенов Москвы и Санкт-Петербурга из группы российских метрополитенов и необходимость проектирования вагонов нового поколения (с новыми ходовыми частями) непосредственно для тяжелых условий эксплуатации столичных метрополитенов;

- наиболее перспективным направлением концептуального развития рам тележек метровагонов является проектирование сварных листовых рам (коробчатого сечения), подобные конструкции наиболее полно обеспечивают требуемые прочностные, технологические, эксплуатационные характеристики, а также позволяют строить оптимальные сечения несущих элементов в соответствии с действующими нагрузками.

Степень достоверности результатов исследования обоснована:

- применением современных методов математического моделирования с помощью средств вычислительной техники;

- усталостными испытаниями новой конструкции рамы тележки;

- динамико-прочностными испытаниями опытного состава вагонов метрополитена с тележками, оборудованными рамами новой конструкции.

Адекватность разработанной математической модели подтверждена в ходе сравнения результатов теоретического исследования с экспериментальными данными испытаний, проведенных Испытательным центром технических и программных средств железнодорожного транспорта (ИЦ ТПС ЖТ) и Научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (ОАО «ВНИИЖТ»).

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертационной работы и полученные результаты опубликованы в 9 печатных работах, в том числе: 3 – в периодическом издании, включенном в перечень ВАК при Минобрнауки России для публикации научных результатов диссертационных работ, [76], [77], [89]; 1 – в сборнике трудов Тринадцатой Научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» [78]; 3 – в патентах на полезные модели [70], [71], [72]; 2 – в отдельных изданиях (нормативно-техническое издание по эксплуатации и ремонту рам тележек вагонов метрополитена [36]; методика определения показателей технико-экономической эффективности подвижного состава и других сложных технических систем метрополитенов [56]).

Результаты работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и выводов, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 117 наименований, списка иллюстративного материала и 3 приложений. Общий объем диссертация составляет 187 страниц (основной текст – 174 страницы, приложения – 13 страниц). Диссертация содержит в текстовой части 24 таблицы и 78 рисунков.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ОБОСНОВАНИЕ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Развернутая постановка проблемы в практической сфере деятельности, связанной с рамами тележек вагонов метро

Предметом настоящего исследования являются рамы тележек вагонов метрополитена. Проблемное состояние этого узла, являющегося основным несущим узлом тележки и в значительной степени определяющего безопасность движения, заключается в ряде положений, приведенных ниже:

- специфичность рам тележек вагонов метрополитена, выделяющая их из семейства рам тележек рельсового подвижного состава и требующая отдельных дополнительных исследований;
- большое количество невзаимозаменяемых конструкций рам тележек, находящихся в эксплуатации на метрополитенах России, требующих выработки на научной основе единой концепции их дальнейшего использования;
- недостаточная надежность рам тележек вагонов старых серий и технико-экономическая необоснованность конструкций тележек вагонов новых моделей;
- изменившиеся условия эксплуатации современных столичных мегаполисов (Москвы и Санкт-Петербурга), приводящие к необходимости разработки и научного обоснования новой стратегии проектирования;
- отсутствие систематизированной информации по условиям и результатам эксплуатации на различных метрополитенах России;
- высокая потребность в новых вагонах метрополитена в связи с развитием метрополитенов и необходимостью увеличения парка вагонов, а также в связи с резким старением имеющегося парка и необходимостью списания из эксплуатации вагонов, выработавших свой ресурс.

Развернем эти положения для более подробной характеристики современного состояния предмета исследования.

Специфичность рам тележек вагонов метрополитена. С одной стороны, очевидно, что рамы тележек вагонов метрополитена относятся к семейству рам тележек рельсового подвижного состава, а проектирование и производство вагонов метрополитена относится к локомотивостроению. Поэтому в большинстве случаев противопоставлять общие принципы построения, расчета и оценки прочности метровагонных рам тележек и рам тележек локомотивов и моторвагонного подвижного состава железных дорог нецелесообразно.

Однако, с другой стороны, ходовые части вагонов метро и рамы тележек имеют существенные особенности, выделяющие их в особую группу. Это связано со спецификой подвижного состава метрополитенов и условиями их эксплуатации. Специфика заключается в следующем.

1 Движение в тоннеле, то есть в условиях слабого путевого развития, с минимальными интервалами между поездами вызывает более серьезные последствия отказов и аварий, что требует обеспечения более высоких (по сравнению с железной дорогой) показателей надежности.

2 Тоннельное движение обусловило и другую существенную особенность: чтобы быстрее пройти и освободить перегон, требуется иметь высокие, максимально допустимые для пассажирского транспорта, ускорения при разгоне и торможении, что существенно меняет, например, картину нагружения рам тележек. Ввиду того, что разгон и торможение обеспечиваются тяговыми электродвигателями, высокие ускорения (в зависимости от модели вагона от 1,2 до 1,4 м/с²) достигаются обмоториванием каждой оси электропоезда (исключение – немоторные поддерживающие тележки вагонов легкого метро «Русич»).

3 Рельсовый путь метрополитенов является более жестким, так как большая часть линий располагается в тоннелях, на мостах и эстакадах, то есть фактически земляное полотно заменено бетонным основанием. Это приводит к более неблагоприятным условиям работы экипажной части вагонов метро по сравнению с подвижным составом железных дорог.

4 Вагон метрополитена должен быть спроектирован таким образом, чтобы была обеспечена нормальная работа всех узлов при двух крайних значениях

загрузки вагона – от фактически порожнего вагона (тара) до максимально загруженного (брутто). Для тягового подвижного состава разность загрузки в 20 тонн (и более) вызывает необходимость в наличии значительных линейных и угловых перемещений некоторых узлов ходовых частей при переменных режимах нагружения, связанных с изменением нагрузки от оси на рельсы.

5 Метрополитен имеет отличные от железных дорог габариты, а также ряд других существенных отличий. Например, энергоснабжение электропоездов метрополитенов осуществляется от контактного рельса, токоєм с которого выполняется при помощи рельсовых токоприемников, устанавливаемых на колесных парах тележек, что значительно изменяет конструкцию тележки и действующие на нее динамические нагрузки.

6 Процессы входа и выхода пассажиров на станциях представляют собой многоцикловое нагружение за период эксплуатации.

Вышеуказанные обстоятельства приводят к следующему. Во-первых, для вагонов метрополитена действуют особые нормы для проектирования, расчета и оценки прочности и динамики механической части [63]. Во-вторых, в метровагоностроении сложилась своя расчетно-проектная и конструкторская школа. В-третьих, метрополитены, выведенные в 1991 году из состава МПС, фактически оказались с этого периода вне единой системы научных исследований, что подтверждается обзором литературы (параграф 1.2).

В настоящий момент на метрополитенах России в эксплуатации находится **большое количество серий и моделей вагонов, имеющих невзаимозаменяемые конструктивные исполнения рам тележек.** В таблице 1.1 приведены обозначения имеющихся в эксплуатации серий и моделей вагонов метрополитена. К сожалению, на данный момент в научно-технической и ведомственной литературе отсутствуют данные по систематизации и классификации ходовых частей многочисленных серий и моделей вагонов. Эта существенная проблема не позволяет, во-первых, провести научный анализ прочностных и надежностных характеристик существующих конструкций, а во-вторых, делает невозможной разработку на научной основе рекомендаций по перспективному развитию узла.

Таблица 1.1 – Метрополитены России. Серии и модели вагонов, находящиеся в эксплуатации по состоянию на 2012-01-01

Условное название групп вагонов	Серии и модели вагонов	Статус вагонов
Вагоны старых серий	Еж, Ем, Еж3, Еж6, Ем-501, Ем-502, Ем-508, Ем-508Т, Ем-509, 81-717, 81-714, 81-717.5, 81-714.5	Находятся в эксплуатации, с серийного производства сняты, рамы тележек производятся промышленностью и поставляются метрополитенам как запасные части
	81-717.5М, 81-714.5М, 81-717.6, 81-714.6, 81-540, 81-541, 81-553.3, 81-554.3, 81-555.3	Имеют статус серийных изделий, находящихся в эксплуатации и производстве
Вагоны новых моделей	81-720, 81-721, 81-720.1, 81-721.1, 81-740, 81-741	Сняты с производства, находятся в эксплуатации
	81-740.1, 81-741.1, 81-740.4, 81-741.4	Статус опытно-промышленных партий, находятся в производстве и эксплуатации

Следующей существенной проблемой является **недостаточная надежность рам тележек вагонов метро старых серий**. Так на Московском метрополитене по состоянию на 2011-01-01 инвентарный парк рам тележек вагонов старых серий составлял 6930 рам. В 2010 году произведено 1263 ремонта и 473 случая списания рам по техническому состоянию, то есть общее количество отказов составило 1736. Сказанное наглядно поясняет круговая диаграмма (рисунок 1.1).

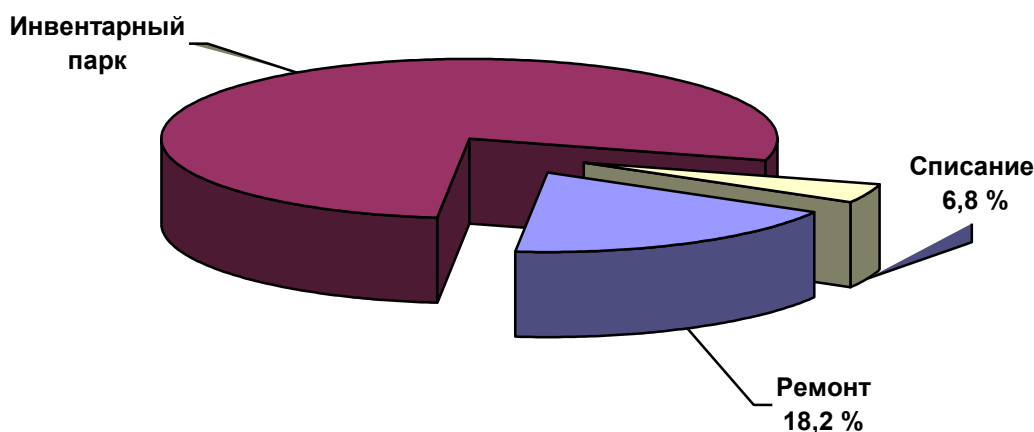


Рисунок 1.1 – Статистика по отказам рам тележек вагонов старых серий (Московский метрополитен, 2010 год)

Можно отметить еще одну важную проблему, значительно снижающую качество знания о предмете исследования. Математическая обработка данных об отказах в течение двух последних десятилетий не производилась. Отсутствие современных статистических моделей в условиях изменившихся условий эксплуатации приводит к невозможности прогнозирования показателей надежности рам тележек, прежде всего вероятности их безотказной работы в зависимости от наработки.

Во второй половине 1990-х годов началась эксплуатация вагонов новых моделей 81-720/721 «Яуза», а в 2004 году вагонов моделей 81-740/741 «Русич». Требуется отметить, что научный анализ этих конструкций по результатам эксплуатации не производился. При наличии достаточно надежной конструкции рам тележек, на первоначальном этапе эксплуатации наблюдалась недостаточная надежность редукторного узла колесной пары и узла подвешивания тягового привода. В результате конструкторской доработки удалось существенно повысить надежность этих узлов. Тем не менее, конструкторско-технологическая сложность этих узлов, большие затраты на изготовление, эксплуатацию и ремонт, обусловленные наличием привода третьего класса, требуют серьезного изучения.

Кроме того, существенный рост столичных городов – Москвы и Санкт-Петербурга привел к крайней перегрузке городских транспортных систем этих городов, включая метрополитены. Рассмотрим это на примере Московского метрополитена, занимающего сегодня второе место в мире (после Токийского) по количеству перевозимых пассажиров – 2,39 млрд пассажиров в 2011 году. Рост объема перевозок на Московском метрополитене при имеющемся парке вагонов и малой эксплуатационной длине линий привел к ухудшению условий эксплуатации вагонов и снижению качества перевозок. Вывод о недостаточной длине линий сделан на основании информационных данных Правительства Москвы [22] по сравнению протяженности линий крупнейших метрополитенов мира, приведенных в таблице 1.2.

Из данных, представленных на рисунке 1.2, видно, что за последние 7 лет объем перевозок на Московском метрополитене увеличился на 61,1 млн пасс.-км

(пассажиро-километров), а парк вагонов увеличился на 170 вагонов. При этом в 2011 году свыше 600 вагонов из состава этого парка достигли срока службы свыше 31 года и подлежат согласно техническим условиям списанию из эксплуатации. Таким образом, Московский метрополитен является одним из самых напряженных в мире.

Таблица 1.2 – Количество перевозимых пассажиров и протяженность линий некоторых крупнейших метрополитенов мира

Показатель	Берлин	Лондон	Париж	Нью-Йорк	Москва
Кол-во пассажиров, перевозимых метрополитеном в 2011 году, млрд человек	0,4	1,1	1,5	1,6	2,39
Протяженность линий метро на 1 тыс. жителей, км/тыс. человек	0,04	0,06	0,1	0,16	0,03

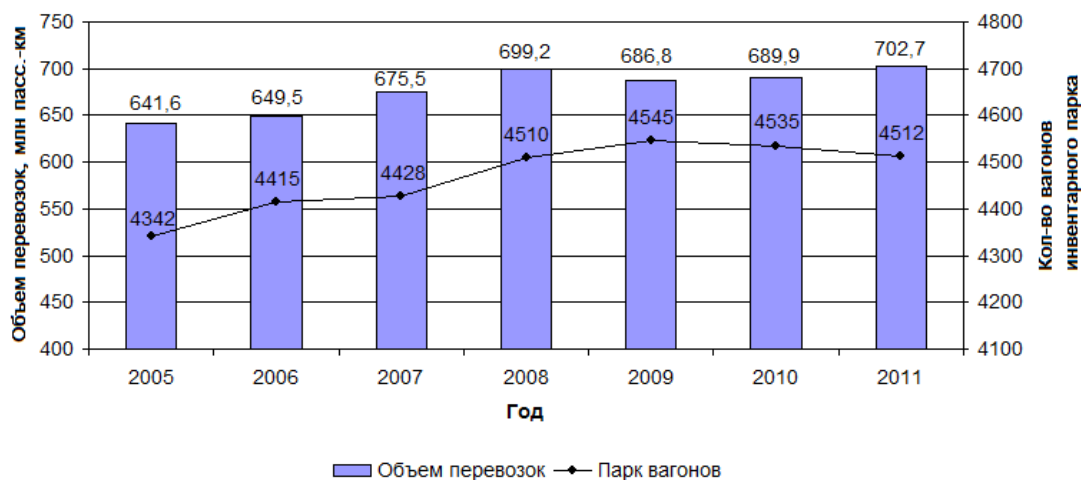


Рисунок 1.2 – Динамика изменения объема пассажироперевозок и инвентарного парка вагонов на Московском метрополитене

О крайне сложных условиях эксплуатации на Московском метрополитене говорят также следующие данные. Ряд важнейших показателей работы метрополитена имеет стремление к достижению максимально допустимых значений. Целесообразно назвать два показателя 2011 года, существенно влияющих на режимы нагружения рам тележек:

- максимальная населенность вагона в час пик составила 235 человек (Арбатско-Покровская линия) или приблизительно 8 человек на квадратный метр.

Это означает приближение фактической загрузки вагона к максимально возможной величине – конструктивной норме, принятой для прочностных расчетов и составляющей 10 человек на квадратный метр;

- минимальный интервал между поездами составил 95 с, что приводит к постоянной работе в режиме «разгон-торможение» с максимально возможными ускорениями (в зависимости от конструкции от 1,2 до 1,4 м/с²).

Таким образом, в рамках данной работы, встает вопрос о научном обосновании новой конструкции тележек и рам тележек, соответствующей требованиям современных мегаполисов.

Необходимо отметить, что приведенная выше информация по изменению условий эксплуатации касалась только Московского метрополитена. На сегодняшний момент сбор и научный анализ информации по эксплуатации на разных метрополитенах России не проводился. **Для выработки концепции дальнейшего развития узла должна быть собрана и изучена информация, исходя из особенностей и результатов эксплуатации всех метрополитенов России.**

Важным обстоятельством является **насушная потребность метрополитенов страны в вагонах нового изготовления** в связи с необходимостью увеличения парка по причине строительства новых линий и необходимостью замены списанных из эксплуатации вагонов. Фактически это поставленная отечественной промышленности задача поставки вагонов, конструкция которых должна соответствовать требованиям современных мегаполисов. В таблице 1.3 представлены данные Московского метрополитена по запланированной закупке нового подвижного состава на период до 2018 года.

Таблица 1.3 – Потребность Московского метрополитена в новых вагонах на период до 2018 года

Запланированная закупка вагонов, год	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Взамен подлежащих списанию, единиц подвижного состава (вагонов)	200	200	200	496	568	584
В связи с расширением метрополитена, единиц подвижного состава (вагонов)	142	364	424	210	280	240
Итого, единиц подвижного состава (вагонов)	342	564	624	706	596	608

Таким образом, выдвигается следующая совокупность вопросов, рассмотрение которых направлено на решение поставленных выше проблем и расширение имеющихся представлений о предмете исследования:

- описание и классификация существующих конструкций, их прочностной анализ;
- выявление особенностей эксплуатации рам тележек на различных метрополитенах России;
- построение статистических моделей и расчет параметров надежности;
- выработка научно обоснованных рекомендаций по производству и эксплуатации существующих конструкций;
- научное обоснование и разработка концепции и технических решений проектирования рамы тележки для перспективного вагона метрополитена современного мегаполиса.

1.2 Обзор и анализ работ по исследованию рам тележек

Исходя из специфических особенностей рам тележек вагонов метрополитена, подробно изложенных в параграфе 1.1, обзор и оценку теоретических работ по теме исследования целесообразно проводить, исходя из теоретической и практической пользы для метровагоностроения.

Комплексные работы по проектированию, испытаниям, исследованиям рам тележек вагонов метрополитена проводились во ВНИИЖТе, ГосНИИВе (сегодня ОАО «НИИ вагоностроения»), МИИТе, ЛИИЖТе, Институте электросварки имени Е.О. Патона НАН Украины, Белорусском научно-исследовательском институте сварки и защитных покрытий, Институте надежности машин Академии наук Белоруссии, Мытищинском машиностроительном заводе (сегодня ОАО «Метровагонмаш»), Ленинградском вагоностроительном заводе имени И.Е. Егорова (сегодня ООО «Вагонмаш имени Егорова»), Калининском (ныне Тверском) вагоностроительном заводе.

Важное значение имели также исследовательские работы, выполненные по теме рам тележек железнодорожного подвижного состава в вышеуказанных институтах и предприятиях, а также во ВНИКТИ, БГТУ, ДИИТе, РИИЖТе, Рижском вагоностроительном заводе и ряде других научных и научно-производственных предприятий.

Значительный вклад в разработку методики расчета рам тележек вагонов метро как статически неопределимой системы внес В.Б. Медель.

Большое значение для установления и регламентирования расчетных схем нагружения и определения рациональных размеров поперечных сечений балок рам тележек различных видов подвижного состава имели работы С.В. Вершинского, В.Н. Котуранова, В.Б. Цкипуришвили, Э.С. Оганьяна, А.В. Иванова, С.В. Дуваляна, С.П. Солодкова, Л.Н. Никольского, Б.Г. Кеглина, Д.Э. Карминского, Н.А. Костенко и других ученых. В частности В.Б. Цкипуришвили (ВНИИЖТ) занимался расчетами оптимальных размеров сечений несущих элементов рам тележек локомотивов.

Важным направлением в исследованиях рам тележек является изучение оценки их прочности. Это комплекс вопросов, включающих обоснование и разработку прочностных норм, разработку расчетно-экспериментальной методики исследования прочностных характеристик рам тележек, изучение напряженного состояния рам, исследование влияния на напряженно-деформированное состояние (НДС) рам тележек эксплуатационных нагрузок и определение предельного состояния рам. Известны работы И.В. Кудрявцева, С.С. Дмитриченко, В.Б. Цкипуришвили, Э.С. Оганьяна, С.Н. Киселева, А.Д. Пузанкова, Р.И. Зайнетдинова, В.Н. Котуранова, В.Д. Хусидова, А.Н. Савоськина, Г.С. Михальченко, Н.А. Панькина и других ученых. Разработке и развитию методов оценки усталостной долговечности рам тележек посвящены работы А.Н. Савоськина, Е.В. Сердобинцева, Г.П. Бурчака, А.П. Матвеевича, С.Н. Киселева, М.Н. Закса, А.Д. Кочнова. В частности А.Н. Савоськиным, Г.П. Бурчаком, А.П. Матвеевичем была разработана методика оценки усталостной долговечности, базирующейся на линейной гипотезе суммирования усталостных повреждений.

Работы по оценке надежности рам тележек на этапах их проектирования, производства, эксплуатации и ремонта проводились А.Н. Савоськиным, А.К. Добрыниным, А.Д. Пузанковым, В.А. Четверговым, Г.П. Бурчаком, Ю.В. Каляжновым и другими.

Следующим направлением исследования рам тележек является изучение влияния концентраторов напряжений, вызванных конструктивными и технологическими причинами, на НДС рамы и сопротивление усталости. Это направление исследований является крайне актуальным, так как теоретические и экспериментальные исследования, направленные на снижение концентрации напряжений, имеют целью создание более прочных и легких конструкций, соответствующих требованиям безопасности. Особенно это важно для сварных рам тележек, в том числе рам тележек вагонов метро, так как сварные швы являются концентраторами напряжений. По этой теме известны работы И.В. Кудрявцева, А.Е. Асниса, В.Т. Трощенко, В.И. Труфякова, А.А. Буханцева, М.М. Крайчика, В.Г. Солодкова. Также можно отметить работы И.В. Баранова по вопросам стендовых испытаний рам тележек, отработке конструкций их элементов, изучению концентраторов напряжений, разработке технологических мероприятий по повышению усталостной прочности.

В тоже время, количество научных работ, выполненных непосредственно по исследованию рам тележек вагонов метрополитена за последние 30 лет, невелико. Рассмотрим кратко содержание этих работ.

Несмотря на относительно давний срок работы, необходимо упомянуть проведенное в 1983 году диссертационное исследование Ю.В. Каляжнова. Автором разработана методика оценки и прогнозирования надежности рам тележек вагонов метрополитена по результатам стендовых и динамических испытаний. На основании анализа эксплуатационных данных произведена классификация отказов элементов рам, определено минимально необходимое количество наблюдаемых объектов. Производилась оценка нагруженности рам для различных эксплуатационных режимов движения по перегонам, то есть на основе анализа нестационарных процессов изменения динамических напряжений. Разработана ме-

тодика обработки нестационарных процессов динамических напряжений с доминантной и несколькими частотными составляющими. Исследован процесс возобновления рам, то есть замены отказавшей рамы новой. Произведено технико-экономическое обоснование выбора уровня надежности рам тележек [42].

Вопросам совершенствования конструкции и технологии изготовления несущих сварных конструкций вагонов метрополитена на основе уточненной оценки НДС посвящено исследование В.В. Смирнова, выполненное в 1995 году [104]. Автор моделирует различные варианты конструкции и технологии изготовления шпиртонного узла рамы тележки. Установлено, что напряженное состояние в зоне кругового шва шпиртонной втулки обладает некоторой асимметрией с возникновением наиболее жесткой схемы остаточных напряжений в направлении продольной оси балки. Автор исследует НДС шпиртонного узла с учетом внесения возможных конструктивно-технологических изменений: изменение толщины и высоты втулки; введение в расчетную модель несплавления по вертикальной стенке; изменение количества проходов при выполнении сварных соединений. Также исследуется кинетика НДС при запрессовке во втулку шпиртона. Автор делает вывод о невозможности конструктивными способами благоприятно перераспределить остаточные напряжения в зоне сварных соединений шпиртонных узлов. При этом обосновывается ряд технологических предложений, направленных на повышение качества узла.

М.Н. Закс (ГосНИИВ), Ю.В. Каляжнов и А.Л. Куряк (ОАО «Метровагонмаш») занимались вопросами отработки методики стендовых усталостных испытаний шпиртонных рам тележек, оценкой усталостной долговечности, разработкой конструкторско-технологических мероприятий по повышению долговечности рам тележек вагонов старых серий [32]. Этими исследователями проводилось обоснование выбора испытательных нагрузок, приближенных к эксплуатационным, оптимизировалась стендовая схема нагружения шпиртонной рамы тележки. Были выполнены сравнительные усталостные стендовые испытания рам тележек. В результате отработана методика стендовых усталостных испытаний с целью выполнения оценки сопротивления усталости рамы и ее узлов, как по напря-

женному состоянию, так и по уровню нагружения. Разработанные конструктивно-технологические мероприятия позволили повысить долговечность шпинтонной рамы тележки.

А.Н. Савоськин и А.Д. Пузанков (МИИТ) занимались в конце 1980-х годов отработкой методики оценки надежности рам тележек вагонов метро старых серий по данным об их отказах в эксплуатации. Определены зависимости элементов поводковых рам тележек от наработки. Интересен вывод о независимости отказа любого элемента рамы, что с точки зрения теории надежности позволяет считать такие элементы последовательно соединенными. Определена зависимость, устанавливающая соотношение между количеством отказов и количеством объектов наблюдения, обеспечивающее получение 90%-го доверительного интервала оценки показателей надежности, ширина которого будет не больше 5 % [85].

В 2002 году А.В. Егоренков (Тверской вагоностроительный завод) проводил исследования напряженного состояния в зонах шпинтонных втулок и местах соединения продольных и поперечных балок, обосновывал технические решения по повышению усталостной долговечности шпинтонных рам тележек. Разработана конечно-элементная модель шпинтонной рамы тележки, учитывающая особенности конструкции в зонах внутренних шпинтонных втулок и соединения балок. Проведены теоретические и экспериментальные исследования НДС продольной балки в зонах образования усталостных трещин для различных конструктивных вариантов. Разработан алгоритм оценки усталостной долговечности рамы, в основу которого положена линейная гипотеза суммирования усталостных повреждений с учетом случайного процесса нагружения [23].

Несколько слов необходимо сказать о том, что за последние 10 лет произошло существенное изменение в методах расчета рам тележек. Речь идет о введении в проектно-расчетные работы конечно-элементных моделей.

Раньше метод конечных элементов применялся в основном в научно-исследовательских работах и был не вполне пригоден для практических инженерных расчетов. Сегодня этот метод считается эффективным методом расчета и

анализа сварных несущих конструкций, в частности рам тележек. Важно отметить, что существует довольно большое количество вариантов этого метода, реализуемых в различных программных комплексах и используемых для математического моделирования. Метод конечных элементов существенно сокращает затраты времени на проведение расчета при значительном повышении точности расчета и возможности определения напряжений в сложных, проблематичных ранее для прочностных расчетов, элементах. Развитием метода конечных элементов за рубежом занимались Д. Норри, Р. Галлагер, К. Бате, Р. Вилсон, Ж. де-Фриз. В России по этой теме работали И.Ф. Образцов (МАИ); В.Н. Котуранов, В.В. Хусидов, С.Н. Киселев, Н.Н. Воронин, М.Н. Овечников (МИИТ); А.Д. Битюцкий (ЛИИЖТ); В.В. Кобищанов, И.Н. Серпик (БГТУ).

Совокупность литературных данных, представленных в настоящем обзоре, дает основание предположить, что проведенные ранее научные исследования объекта «прочностные и надежностные характеристики рам тележек» затрагивали следующие темы:

- разработка и отработка методик расчета;
- оценка прочностных характеристик рам, включая нормативную и расчетно-экспериментальную часть вопроса;
- изучение напряженно-деформированного состояния рам, включая влияние конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов;
- работы по оценке надежности рам тележек на всех этапах их жизненного цикла.

При этом работы непосредственно по рамам тележек вагонов метрополитена немногочисленны, выполнены относительно давно и сосредоточены на исследовании отдельных локальных узлов или отдельных конструкций рам тележек вагонов старых серий.

Таким образом, по состоянию на сегодняшний момент отсутствуют исследования, затрагивающие следующие идеи:

- комплексные сравнительные исследования прочности и безотказности всех существующих конструкций рам тележек вагонов метро;

- современный статистический анализ результатов эксплуатации и оценка параметров надежности рам тележек различных метрополитенов страны;
- прочностные особенности начавших применяться в метровагоностроении листовых рам тележек (коробчатого сечения) взамен сварноштампованных;
- научно обоснованная концепция дальнейшего развития существующих конструкций;
- научное обоснование необходимости и концепции изменения существующего объекта – разработка новой конструкции рамы тележки вагона, удовлетворяющей изменившимся требованиям современных мегаполисов;
- алгоритм разработки нового объекта, учитывающий комплексный подход к построению рам тележек с использованием предыдущего опыта и современных методов проектирования;
- критическая оценка современных методов математического моделирования с приоритетом на построение адекватной модели, ориентированной на достижение совпадения результатов расчета, испытаний и эксплуатации.

Итак, сформулированы вопросы, решение которых позволит несколько расширить имеющиеся представления об объекте исследования и снять остроту поставленных выше проблем. Это и составит основные задачи настоящей диссертационной работы.

1.3 Обоснование программы и методы исследования

Основная линия программы исследования определена:

- основной задачей, сформулированной в названии работы, – «Обоснование и разработка концепции и технических решений проектирования рамы тележки вагона метрополитена современного мегаполиса»;
- объектом исследования – «Прочностные и надежность характеристики рам тележек».

Составление развернутой программы исследования для достижения поставленной задачи затруднено отсутствием в современной литературе четко

определенной методики обоснования и создания нового технического объекта. Возможны два основных пути.

Первый возможный путь решения поставленной задачи:

- определение основных требований, предъявляемых метрополитенами столичных мегаполисов, к ходовой части и рамам тележек;
- обоснование и разработка концепции нового проектирования тележки и рамы тележки;
- разработка физической и математической моделей рамы тележки и ее прочностной расчет;
- исследование прочностных характеристик объекта в рамках построенной модели;
- экспериментальное исследование опытных изделий;
- технико-экономическое обоснование новой конструкции;
- развернутый сравнительный прочностной анализ новой конструкции с конструкцией-прототипом.

Второй возможный путь решения поставленной задачи:

- исследование существующих конструкций с приоритетом на их классификацию, изучение прочности и безотказности;
- изучение особенностей и результатов эксплуатации российских метрополитенов;
- сбор статистических данных по отказам и построение статистических моделей;
- обоснование и разработка концепции нового проектирования тележки и рамы с учетом предыдущего опыта проектирования и эксплуатации;
- разработка физической и математической моделей рамы тележки с учетом опыта моделирования и расчета предыдущих конструкций;
- исследование прочностных характеристик полученного объекта;
- экспериментальное исследование опытных изделий;
- технико-экономическое обоснование новой конструкции;

- развернутый сравнительный прочностной анализ новой конструкции с конструкцией-прототипом.

Первый путь исследования с методологической точки зрения позволяет в большей степени сосредоточиться на теоретическом аспекте. При этом фактически моделирование начинается уже на начальном этапе исследования, связанном с необходимостью изучения действующих на изучаемый предмет факторов, перевода существенных факторов в численную математическую форму и игнорировании несущественных факторов. Однако такой подход имеет ряд недостатков. Прежде всего, это отрыв от имеющегося опыта проектирования и сосредоточение на построении новых математических моделей, практическая ценность которых может быть проблематичной.

Нам представляется более правильным выбор второго пути решения поставленной задачи, который имеет следующие преимущества:

- изучение предыдущего опыта, в том числе с акцентом на выяснение причин несоответствия результатов предыдущих расчетно-проектных и экспериментальных работ с результатами эксплуатации;

- затрагивание актуальных проблем, изложенных в параграфах 1.1, 1.2, что принесет, во-первых, отдельную научно-практическую ценность, а во-вторых, позволит выполнить основную задачу на базе расширенных научных представлений о предмете исследования, что с точки зрения методологии научной работы повышает вероятность достижения научной истины;

- разработка концепции нового проектирования с позиций сохранения преемственности, выявления общих закономерностей развития, сохранения положительных сторон старых конструкций и исключения ошибочных решений.

Вышеуказанные аргументы являются решающими.

Выбор и обоснование методов исследования. Теоретические исследования выполнены с применением следующих методов. В части работы, посвященной построению статистических моделей и расчету характеристик надежности рам тележек использованы методы теории надежности, теории вероятностей, математической статистики. Для идентификации законов распределения наработки

до отказа выбран метод моментов. Выбор данного метода обусловлен следующим: во-первых, этот метод наиболее приемлем в случае достаточно большого числа наблюдений, как в нашем случае; во-вторых, этот метод хорошо отработан в локомотиво- и вагоностроении.

В части работы, связанной с разработкой новой конструкции рамы тележки, использована методика конструирования принятая в общем и транспортном машиностроении. При этом по причине специфики узла, применялись правила и нормы проектирования сварных конструкций рам тележек локомотивов и вагонов. Также применялся метод трехмерного моделирования Solid Works.

Необходимо отметить, что расчетно-проектная часть работы выполнена диссертантом в составе коллектива СКБ ОАО «Метровагонмаш», которому выражается искренняя благодарность.

Математическое моделирование новой конструкции производилось, прежде всего, с целью изучения конструкции и оценки прочностных характеристик по допускаемым напряжениям и на сопротивление усталости согласно действующим нормам [63]. Примененный для этого метод конечных элементов (МКЭ) является сегодня наиболее эффективным и широко применяемым инструментом анализа НДС узлов, в том числе рам тележек. Основное преимущество этого численного метода (в отличие от аналитических методов), способствующего его распространению в инженерной сфере, заключается в отсутствии ограничений из-за формы тел и способов приложения нагрузок, что позволяет получать достаточно точные результаты при расчете узлов соединения балок и кронштейнов сложной конфигурации, присоединенных к основным балкам рамы тележки.

При теоретическом исследовании новой конструкции рамы тележки применен программный комплекс ANSYS 10.0 (продукт фирмы ANSYS Inc., США), механическую и математическую базу которого составляет МКЭ. Причины выбора этой программы из относительно большого количества современных программных комплексов, реализующих МКЭ, следующие:

- данная программа ориентирована на разработку полноценных конечно-элементных моделей и имеет достаточно хорошие возможности учета при моде-

лировании геометрических и силовых факторов, что актуально для темы, связанной с рамами тележек;

- наличие положительного опыта применения этой программы в области сложных прочностных расчетов в общем и транспортном машиностроении в России, США, Германии и других странах;

- наличие опыта применения этого программного комплекса при разработке некоторых предыдущих конструкций рам тележек вагонов метрополитена, например вагонов моделей 81-740, 81-741.

Основные положения и математическая сущность МКЭ рассмотрены в главе 3 настоящей диссертационной работы.

В качестве методов экспериментальной части работы применены:

- тензометрирование и усталостные (вибрационные стендовые) испытания опытного натурального образца рамы тележки новой конструкции;

- тензометрирование и динамико-прочностные ходовые испытания электропоезда, оборудованного тележками и рамами новой конструкции.

Методика стендовых и динамико-прочностных испытаний подробно рассмотрена в главе 4 настоящей диссертационной работы.

В качестве резюме главы 1 в виде алгоритма приводится развернутая программа исследования (рисунок 1.3).

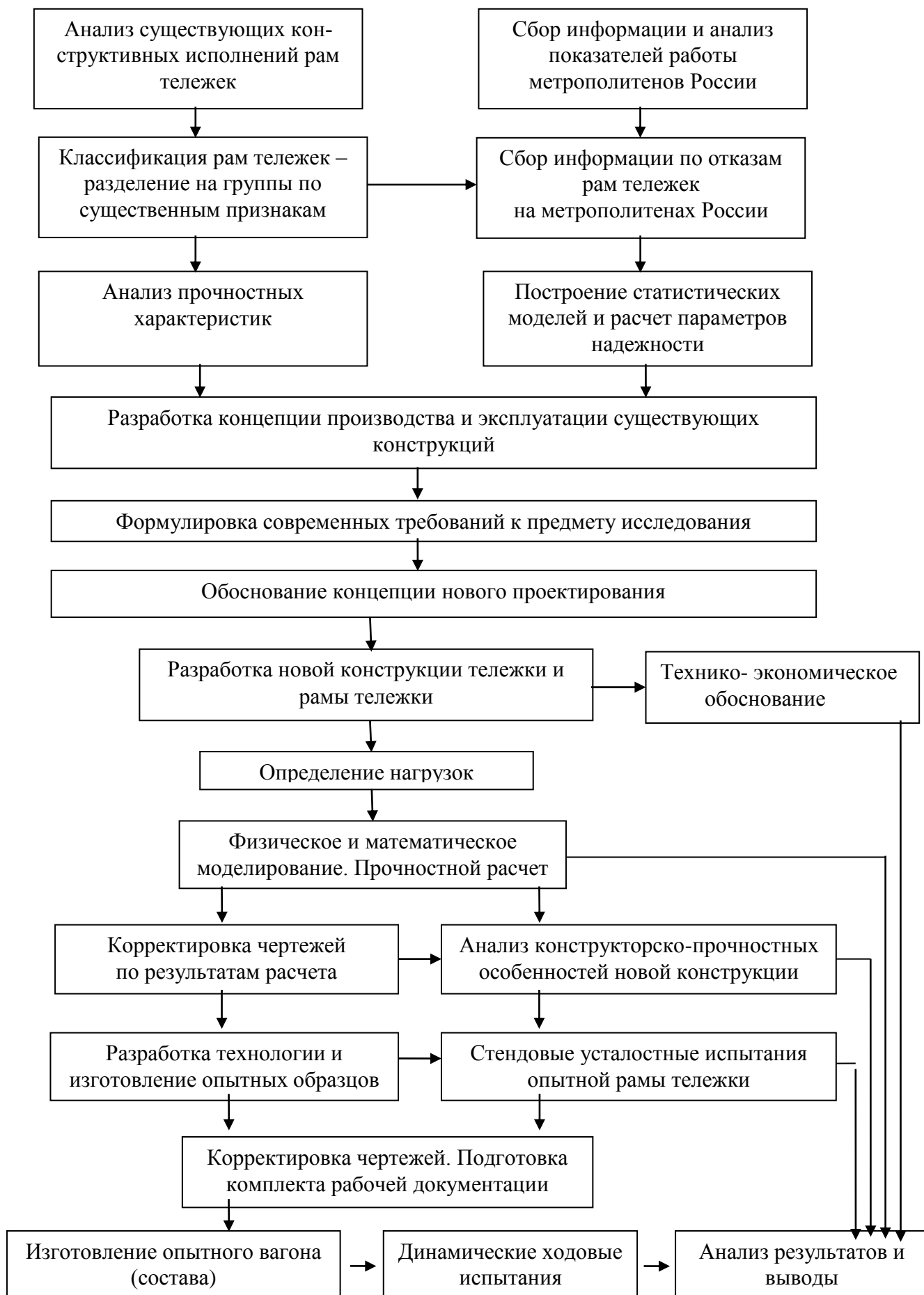


Рисунок 1.3 – Алгоритм обоснования и разработки конструкции рамы тележки вагона метрополитена современного мегаполиса

ГЛАВА 2 ЭВОЛЮЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ РАМ ТЕЛЕЖЕК ВАГОНОВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

2.1 Парк подвижного состава отечественного метрополитена

Будем считать вагонами метрополитена специальный пассажирский подвижной состав, соответствующий требованиям ГОСТ Р 50850 «Вагоны метрополитена. Общие технические условия» и предназначенный для эксплуатации на линиях метрополитена, спроектированных по СНиП 11-40 «Метрополитены».

Таких метрополитенов в России по состоянию на 2012 год насчитывается семь. Общие технические характеристики этих метрополитенов представлены в таблице 2.1 (данные Международной ассоциации «Метро»).

Таблица 2.1 – Основные характеристики метрополитенов России по состоянию на 2011-01-01

Название метрополитена (по городу нахождения)	Год открытия	Эксплуатационная длина линий, км	Кол-во станций/линий	Кол-во вагонов инвентарного парка	Средний пассажиропоток за день/год, тыс. человек
Московский	1935	301,2	182/12	4512	6 550/ 2 392 000
Санкт-Петербургский	1955	112,54	63/5	1440	2 300/ 829 800
Нижегородский	1985	15,5	13/2	80	88/ 32 200
Новосибирский	1986	14,2	12/2	92	202,4/ 73 873
Самарский	1987	11,4	9/1	46	45,6/ 16 658
Екатеринбургский	1991	8,51	7/1	54	133,8/ 48 900
Казанский	2005	10,32	7/1	23	30,1/ 11 000

Российские метрополитены эксплуатируют подвижной состав отечественного изготовления. Основных разработчиков и производителей вагонов метрополитена два: ОАО «Метровагонмаш» (г. Мытищи) и ООО «Вагонмаш имени Егорова» (г. Санкт-Петербург). Чтобы исследовать имеющийся парк вагонов

метрополитена требуется изучить его структуру и выполнить систематизацию этой структуры.

В настоящий момент на российских метрополитенах эксплуатируется свыше 30 различных серий и моделей вагонов. Разделение этих многочисленных серий и моделей на несколько групп выполнено, исходя из анализа существенных признаков ходовых частей: нагрузки от колесной пары на рельсы, связи кузова с тележкой, связи колесной пары с рамой тележки, конструкции подвешивания тягового привода, мощности тяговых электродвигателей. По результатам анализа вагоны объединены в группы с рабочими названиями, под которыми они заявлены в данном исследовании. Результаты приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Классификация серий и моделей вагонов, эксплуатируемых на российских метрополитенах, по группам с близкими конструкциями тележек

№ группы	Серии и модели вагонов, находящиеся в эксплуатации	Принимаемое рабочее название группы вагонов
1	Еж, Ем, Еж3, Еж6, Ем-501, Ем-502, Ем-508, Ем-508Т, Ем-509	Модификации вагона серии Е
2	81-717, 81-714	Вагоны серий 81-717, 81-714
3	81-717.5, 81-714.5, 81-717.5М, 81-714.5М, 81-717.6, 81-714.6, 81-540, 81-541, 81-553.3, 81-554.3, 81-555.3	Вагоны серий 81-717.5, 81-714.5 и их модификации
4	81-720, 81-721, 81-721.1, 81-721.1	Вагоны моделей 81-720, 81-721 и их модификации («Яуза»)
5	81-740, 81-741, 81-740.1, 81-741.1, 81-740.4, 81-741.4	Вагоны моделей 81-740, 81-741 и их модификаций («Русич»)
Примечание – Ввиду многочисленности конструктивных исполнений, разделение на группы произведено, исходя из приоритета общих характеристик тележек, а не конструктивной взаимозаменяемости. То есть тележки двух вагонов разных серий одной группы могут иметь невзаимозаменяемые тележки (например, из-за особенностей тормозной системы, электромонтажа, тяговых двигателей и многих других причин).		

Таким образом, выделяются пять групп отечественных метровагонов:

- модификации вагона серии Е;
- вагоны серий 81-717, 81-714;
- вагоны серий 81-717.5, 81-714.5 и их модификации;
- вагоны моделей 81-720, 81-721 и их модификации («Яуза»);
- вагоны моделей 81-740, 81-741 и их модификации («Русич»).

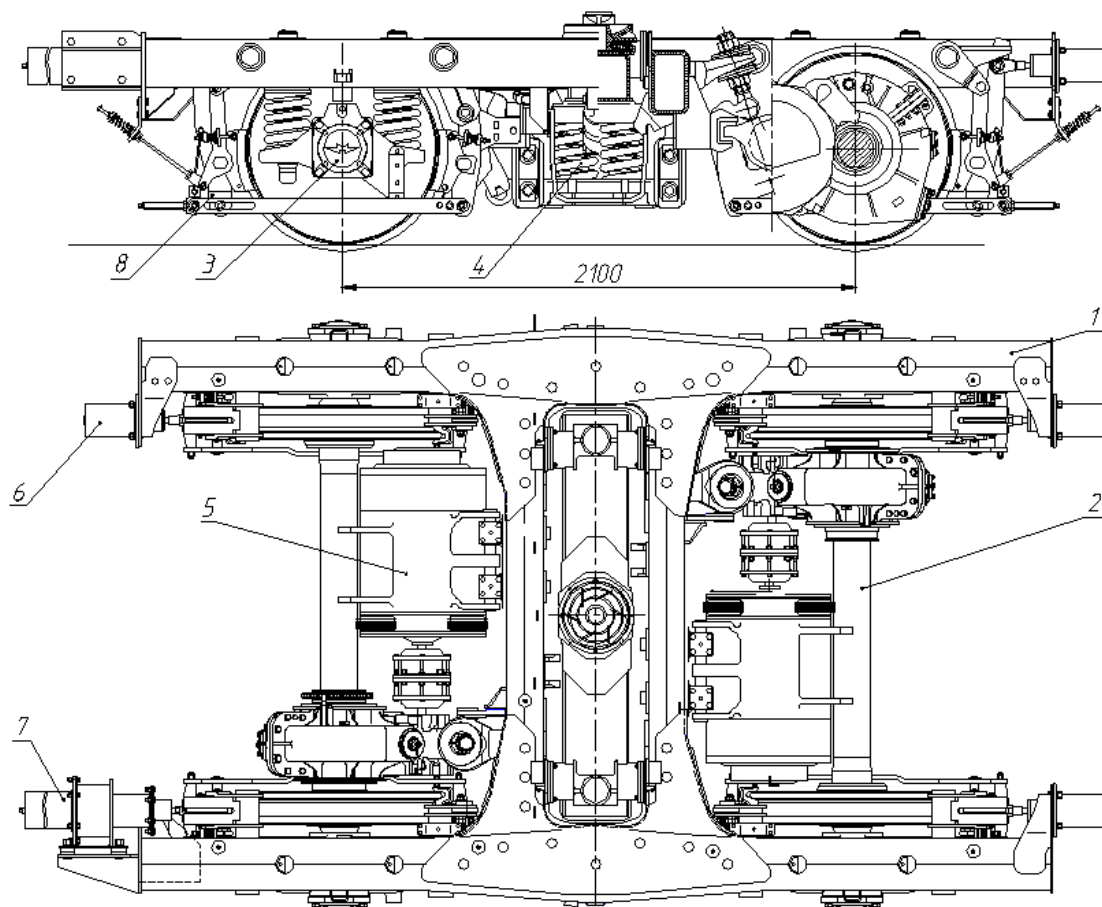
Технические характеристики тележек выделенных групп вагонов метрополитена представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Технические характеристики тележек вагонов метрополитена

Характеристика	Серия или модель вагона				
	Модификации вагона Е	81-717, 81-714	81-717.5, 81-714.5 и модификации	81-720, 81-721 и модификации («Яуза»)	81-740, 81-741 и модификации («Русич»)
Годы выпуска	1970-1978	1978-1989 (позднее – разовые партии вагонов)	с 1989 по настоящее время	1997-2002, 2005	с 2002 по настоящее время
Осевая формула вагона	2 ₀ -2 ₀	2 ₀ -2 ₀	2 ₀ -2 ₀	2 ₀ -2 ₀	2 ₀ -2-2 ₀ *
Максимальная нагрузка от оси на рельсы, кН (тс)	130,39 (13,3)	133,3 (13,6)	133,3 (13,6)	147,0 (15,0)	127,4 (13,0)
Масса тележки, кг	7500	7600	7500	8000	7800
База тележки, мм	2100	2100	2100	2150	2150
Диаметр нового колеса по кругу катания, мм	780	780	780	860	860
Связь колесной пары с рамой тележки	поводковая	поводковая	шпинтонная	шарнирно-рычажная	шарнирно-рычажная
Связь кузова с моторной тележкой	пятниковый узел	пятниковый узел	пятниковый узел	наклонная тяга	наклонная тяга
Мощность тягового электродвигателя, кВт	72	115	115	120 (170)	170
Вид тока тягового двигателя	постоянный	постоянный	постоянный	постоянный; переменный	переменный
Класс подвешивания тягового привода**	2	2	2	3	3
Рессорное подвешивание	двухступенчатое пружинное	двухступенчатое пружинное	двухступенчатое пружинное	двухступенчатое (центральное - пневматическое)	двухступенчатое (центральное - пневматическое)
<p>Примечания</p> <p>1 * Вагон «Русич» состоит из двух сочлененных кузовов. Вагон имеет три тележки: две крайние моторные; средняя промежуточная, немоторная, на которую опираются два кузова.</p> <p>2 ** Согласно классификации профессора Бирюкова И.В.</p> <p>3 Даны усредненные массы тележек</p>					

Рассмотрим конструктивные особенности тележек всех пяти групп вагонов, более подробно останавливаясь на двух группах, продолжающих серийно изготавливаться – вагонов серий 81-717.5, 81-714.5 и модификаций; моделей 81-740, 81-741 и модификаций.

Общий вид тележки вагонов серий 81-717.5, 81-714.5 и модификаций представлен на рисунке 2.1.



1 - рама тележки; 2 - колесная пара с редуктором; 3 - букса и буксовое подвешивание; 4 - центральное подвешивание; 5 - тяговый электродвигатель; 6 - тормозной цилиндр; 7 - блок-тормоз; 8 - рычажно-тормозная передача

Рисунок 2.1 – Общий вид тележки вагонов серий 81-717.5, 81-714.5 и модификаций

Тележки двухосные, с индивидуальным тяговым приводом и двухступенчатым рессорным подвешиванием. Вертикальная нагрузка передается от кузова на тележку и рельсы следующим образом: кузов – пятниковый узел – центральная балка – пружины центрального подвешивания – поддоны, подвески и серьги – рама тележки – пружины буксового подвешивания – буксы – колесные пары – рельсы. Боковая качка кузова вагона ограничена боковыми скользящими элементами, расположенными на центральных балках. Вращающий момент передается от тягового двигателя на вал-шестерню редуктора и большое зубчатое колесо, напрессованное через втулку на ось колесной пары. Тяговый электродвигатель имеет опорно-

рамное подвешивание с опиранием на три точки – два верхних моторных кронштейна поперечной балки рамы тележки, нижняя третья точка крепления выполнена через реактивную тягу с закреплением на второй (дальней) поперечной балке. Тяговый редуктор имеет опорно-осевое подвешивание. Вал тягового двигателя соединен с валом-шестерней редуктора через муфту (карданную или зубчатую). Связь колесной пары с рамой тележки через шпиртонный узел, представляющий собой механизм поступательной пары с цилиндрическими направляющими. Тяговые усилия передаются от колесной пары на раму вагона по следующей цепочке: колесная пара – букса – через пару трения «пластмасса-металл» на запрессованный в раму шпиртон – рама тележки – наличники рамы тележки – наличники центральной балки – центральная балка – пятниковый узел – рама вагона. Механический тормоз тележки дотормаживающий (основной тормоз – электрический) представляет пневматический колодочный тормоз с двухсторонним прижатием колодок к колесу. На торцевых плитах рамы тележки установлены тормозные цилиндры (по одному на каждое колесо), причем один из них выполнен в виде блок-тормоза, представляющего собой стояночный пневмопружинный тормоз (тормозной цилиндр с дополнительной стояночной камерой). От тормозных цилиндров усилия передаются через систему тяг и рычагов к тормозным колодкам.

Тележки вагонов серий 81-717, 81-714, Е рассмотрим, сравнивая их конструкции с тележками вагонов 81-717.5 и 81-714.5, описанными выше.

Тележки вагонов серий 81-717 и 81-714 имеют только одно принципиальное отличие от тележек вагонов 81-717.5, 81-714.5. Горизонтальные связи колесных пар с рамой тележки осуществляются не через шпиртонный узел, как на вагонах 81-717.5/714.5, а при помощи поводков, то есть имеют поводковую связь колесной пары с рамой тележки. Каждая букса соединяется с рамой тележки при помощи пары поводков – крайнего изогнутого поводка, закрепляемого на торцевой плите продольной балки рамы, и среднего прямого поводка, соединяемого с рамным поводковым кронштейном.

Теперь проведем по такой же схеме сравнение тележек модификаций вагона серии Е с тележками вагонов 81-717.5/714.5 и 81-717/714. Тележки модификаций вагона Е имеют, как и вагоны 81-717/714 поводковую связь колесной пары с рамой тележки. При этом они имеют следующие существенные отличия:

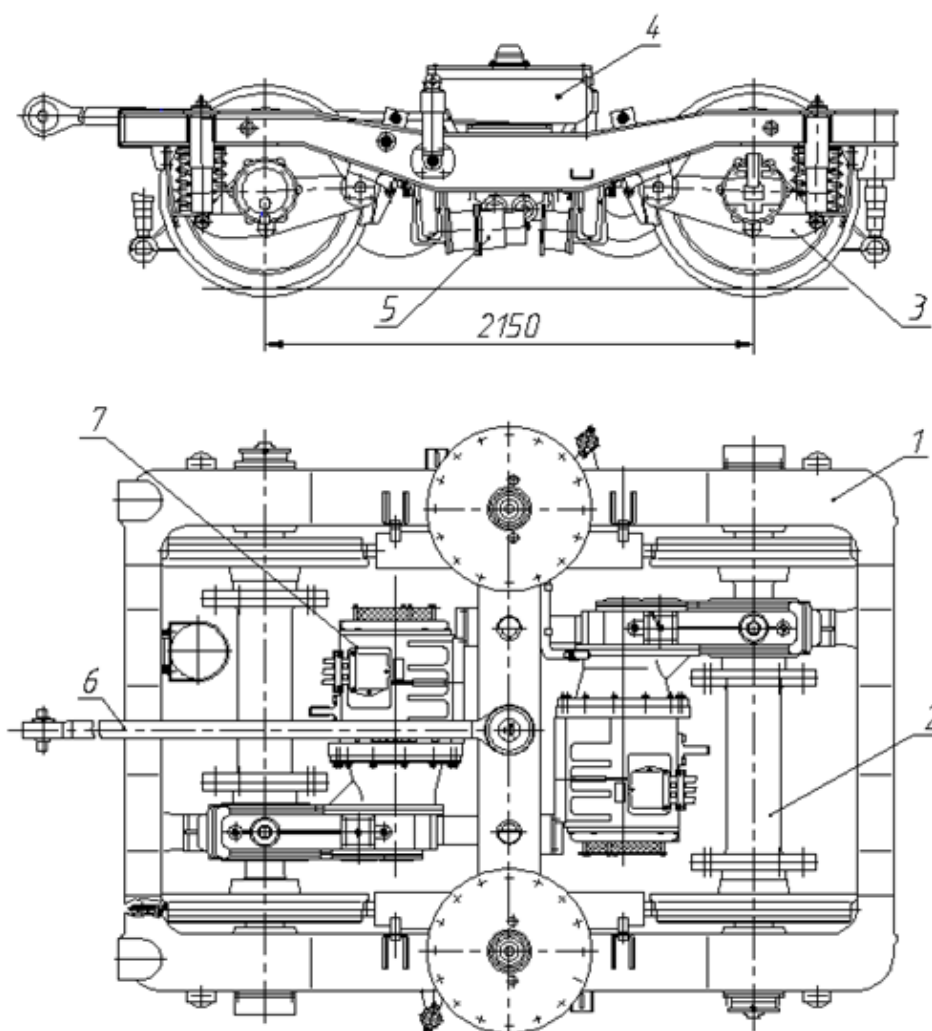
- меньшая мощность тяговых двигателей (72 кВт по сравнению с мощностью 115 кВт двигателей тележек вагонов 81-717.5/714.5, 81-717/714);
- конструкция подвешивания тягового двигателя выполнена без реактивной тяги, в виде трехточечного подвешивания на одной поперечной балке;
- тормозная система тележки не имеет стояночного пневмопружинного агрегата – блок-тормоза, применяются только тормозные цилиндры, для длительного затормаживания при стоянке имеется рычажная передача ручного тормоза, соединенная с основным механическим тормозом.

Таким образом, проведенное техническое описание тележек позволило выявить конструктивное сходство и отличия тележек вагонов серий Е, 81-717/714, 81-717.5/714.5. Имеющееся сходство компоновок этих тележек позволит в ряде случаев в данной работе условно заявлять их, как тележки вагонов старых серий.

Тележки вагонов моделей 81-740/741 и модификаций. Общий вид моторной тележки вагонов моделей 81-740, 81-741 представлен на рисунке 2.2.

Тележки двухосные, с индивидуальным тяговым приводом и двухступенчатым рессорным подвешиванием. Центральное подвешивание – пневматическое. Вертикальная нагрузка передается от кузова на тележки и рельсы следующим образом: пневморессоры – рама тележки – пружины буксового подвешивания – буксы – колесные пары – рельсы. Связь кузова с тележкой осуществлена через наклонную тягу. Поперечные перемещения кузова ограничены центральным упором, расположенным на шкворне соединения наклонной тяги с рамой тележки, и боковыми упорами, расположенными на раме вагона. Тяговый привод имеет опорно-рамное подвешивание тягового двигателя и редуктора (привод третьего класса). Конструктивно тяговый двигатель и редуктор объединены через переходной фланец в один блок и подвешены на трех точках на раме тележки. Вращающий момент передается от тягового электродвигателя по следующей схеме:

вал двигателя – вал-шестерня редуктора – промежуточная паразитная шестерня редуктора – зубчатое колесо выходного вала – полый вал колесной пары с шарнирно-поводковыми муфтами – ходовое колесо. Связь колесной пары с рамой тележки выполнена через шарнирно-рычажный механизм. Тяговые усилия передаются от колесной пары на раму вагона так: колесная пара – букса (имеет рычаг с шарниром) – рама тележки – наклонная тяга – рама вагона. Механический дотормаживающий тормоз (основной тормоз – электрический) представляет пневматический колодочный тормоз с односторонним прижатием колодки к колесу. Составляет из четырех блок-тормозов (по одному на ходовое колесо), устанавливаемых на продольной балке рамы тележки.



1 - рама тележки; 2 - колесная пара с редуктором; 3 - букса и буксовое подвешивание; 4 - центральное подвешивание; 5 - механический тормоз; 6 - связь кузова с тележкой; 7- тяговый электродвигатель

Рисунок 2.2 – Общий вид тележки вагонов моделей 81-740, 81-741 и модификаций

Тележки вагонов моделей 81-720, 81-721 и модификаций рассмотрим, сравнивая их с подробно описанными выше тележками вагонов 81-740/741. Опустив неприципиальные для данного исследования конструктивные отличия (в том числе приводящие к их невзаимозаменяемости) считаем тележки этих вагонов идентичными по конструкции. При этом необходимо отметить следующее. Нагрузка от колесной пары на рельсы у вагонов 81-720/721 составляет 147 кН, у вагонов 81-740/741, разработанных для линий легкого метро, 127,4 кН. Эта значительная разница изменяет динамику экипажа, а касательно темы данного исследования существенно меняет напряженное состояние рамы тележки.

Выявленное сходство позволяет условно в ряде случаев называть вагоны моделей 81-740/741, 81-720/721 вагонами новых моделей.

Теперь необходимо обратиться вновь к структуре российских метрополитенов на предмет выявления количественной структуры парка подвижного состава. Данная структура представлена в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Структура парка вагонов российских метрополитенов по состоянию на 2011-01-01

Название метрополитена	Кол-во вагонов инвентарного парка					
	модификации вагонов E	81-717, 81-714	81-717.5, 81-714.5 и модификации	81-720, 81-721 и модификации («Яуза»)	81-740, 81-741 и модификации («Русич»)	Итого
Московский	627	1407	1856	85	537	4512
Санкт-Петербургский	695	362	383	-	-	1440
Нижегородский	-	68	12	-	-	80
Новосибирский	-	66	26	-	-	92
Самарский	-	32	14	-	-	46
Екатеринбургский	-	-	54	-	-	54
Казанский	-	-	20	-	3	23

Анализ имеющейся информации показывает, что, Московский метрополитен является самым крупным и пассажиронапряженным метрополитеном России. Кроме того, только Московский метрополитен имеет в составе своего парка все пять выделенных для исследования групп рам тележек. Поэтому принимается

решение о принятии Московского метрополитена в качестве базового для изучения результатов эксплуатации рам тележек.

Структура парка вагонов Московского метрополитена в виде диаграммы приведена на рисунке 2.3.

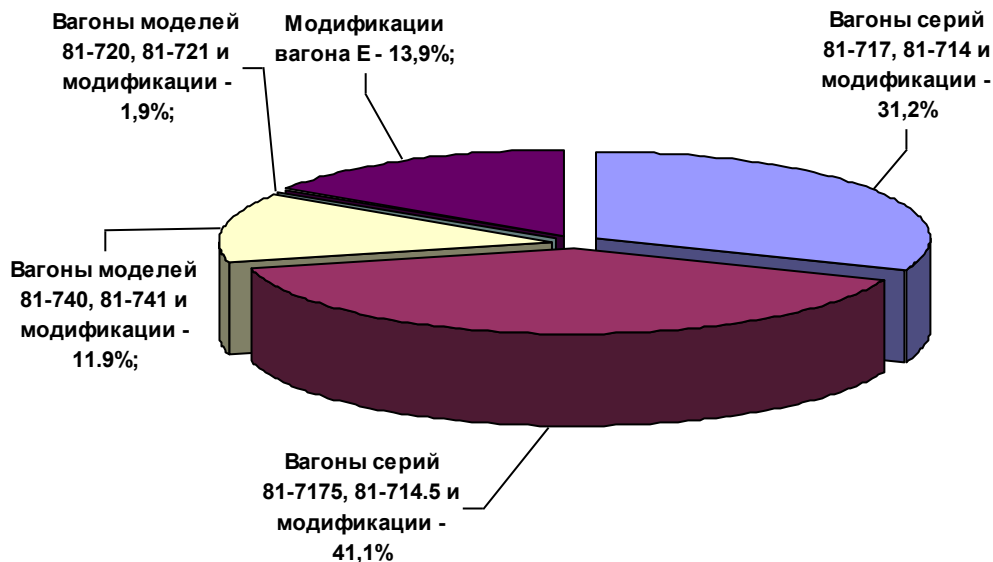


Рисунок 2.3 – Структура парка вагонов Московского метрополитена по состоянию на 2011-01-01

2.2 Конструктивные исполнения рам тележек и их прочностной анализ

Произведем анализ существующих конструктивных исполнений рам тележек по следующему плану:

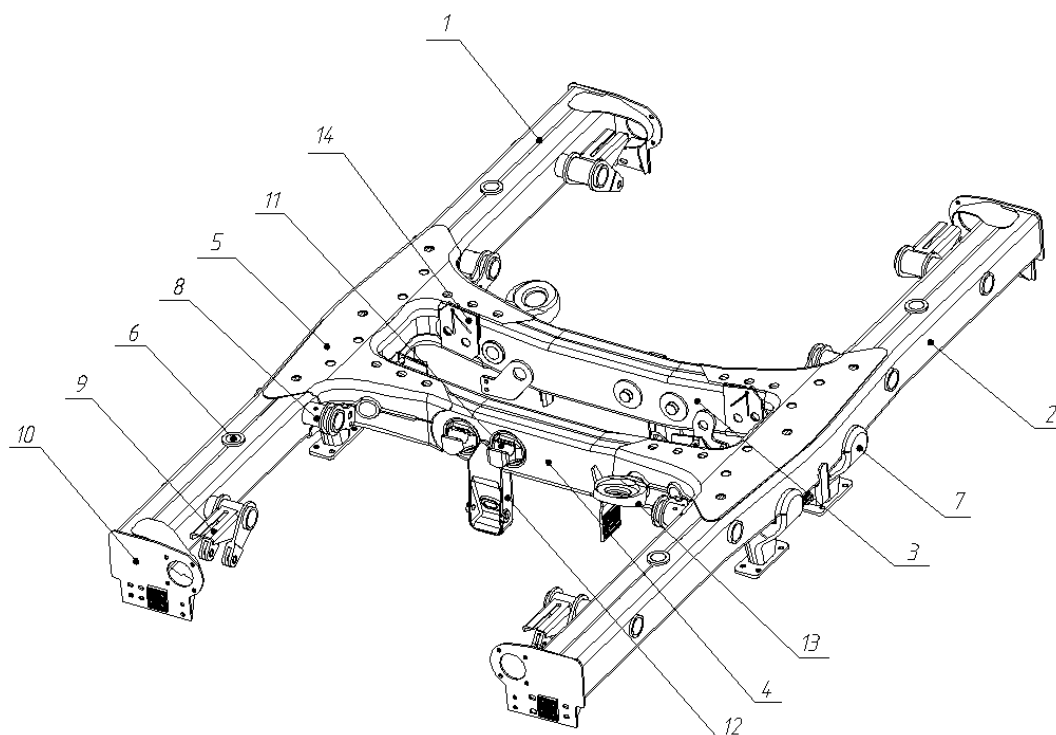
- 1 Техническое описание конструкций рам тележек каждой из пяти выделенных в параграфе 2.1 групп вагонов метрополитена;
- 2 Прочностной анализ каждой группы.

При этом важно выполнить рассмотрение каждого конструктивного исполнения не изолированно, а в процессе их эволюционного развития.

Рамы тележек вагонов модификаций серии Е. Вагоны данных серий выработали свой ресурс и подлежат списанию из эксплуатации. Тем не менее, исключать их анализ нецелесообразно. Во-первых, количество эксплуатирующихся в

настоящее время вагонов этой группы велико (таблица 2.4). Списание такого количества вагонов (более 1000 вагонов в России) в краткие сроки невозможно и их эксплуатация будет определенное время продолжаться. Во-вторых, продолжается изготовление новых рам тележек этой конструкции взамен списанных по достижению назначенного ресурса или по техническому состоянию. В-третьих, эта конструкция является базовой, на основе которой разработаны все последующие конструктивные исполнения рам тележек вагонов метро старых серий.

Общий вид рамы тележки модификаций вагонов серии Е приведен на рисунке 2.4.

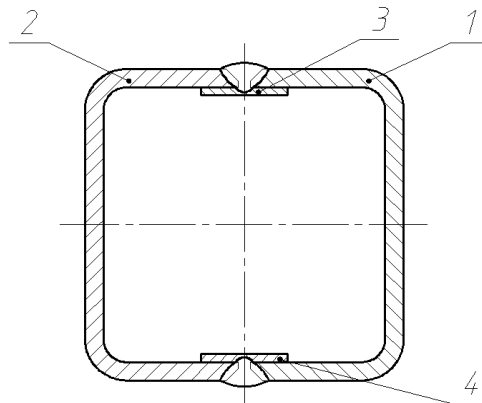


1, 2 - продольные балки; 3, 4 - поперечные балки; 5 - верхняя усиливающая косынка; 6 - направляющая втулка буксового подвешивания; 7 - кронштейн крепления буксовых поводков; 8 - средний тормозной кронштейн; 9 - крайний тормозной кронштейн; 10 - кронштейн тормозного цилиндра; 11 - верхние моторные кронштейны; 12 - нижний моторный кронштейн; 13 - кронштейн подвешивания редуктора; 14 - наличник центрального подвешивания

Рисунок 2.4 – Общий вид рамы тележки модификаций вагонов серии Е

Рама тележки сварной конструкции Н-образной формы с двумя продольными и двумя поперечными балками. Зоны соединения балок усилены сверху и снизу штампованными фигурными косынками. Материал рамы тележки – сталь 20 или сталь 3сп. Масса рамы 1250 кг. Каждая балка изготавливается из двух

штампованных швеллерообразных профилей толщиной 10 мм, сваренных встык (рисунок 2.5). Будем называть далее подобные рамы сварноштампованными.



1 - коробка правая; 2 - коробка левая; 3, 4 - подкладки

Рисунок 2.5 – Сечение балок рам тележек сварноштампованной конструкции (внутренние ребра жесткости не показаны)

На продольных балках рамы расположены кронштейны крепления буксовых поводков, кронштейны для установки рычажно-тормозной передачи и тормозных цилиндров, вварены направляющие втулки, в которые с зазором входят предохранительные штыри букс. На поперечных балках расположены кронштейны тяговых двигателей и редукторов, армированные окна и отверстия с запрессованными втулками для монтажа узла центрального подвешивания. Для передачи тяговых и тормозных сил с рамы тележки на балку центрального подвешивания на поперечных балках со стороны внутреннего проема установлены наличники.

Тяговые двигатели устанавливаются на поперечную балку на трех кронштейнах – двух верхних и нижнем. Верхние моторные кронштейны, кронштейны подвешивания редуктора изготавливаются из штампованных заготовок. В балке под их установку обрабатываются по два отверстия, в которые вваривается своей цилиндрической частью каждый кронштейн и усиливается фланцами.

Для снижения возможности появления остаточных деформаций, вызванных неравномерным нагревом при сварке и внутренними остаточными сварочными напряжениями, рамы собираются и свариваются в специальных кондукторах.

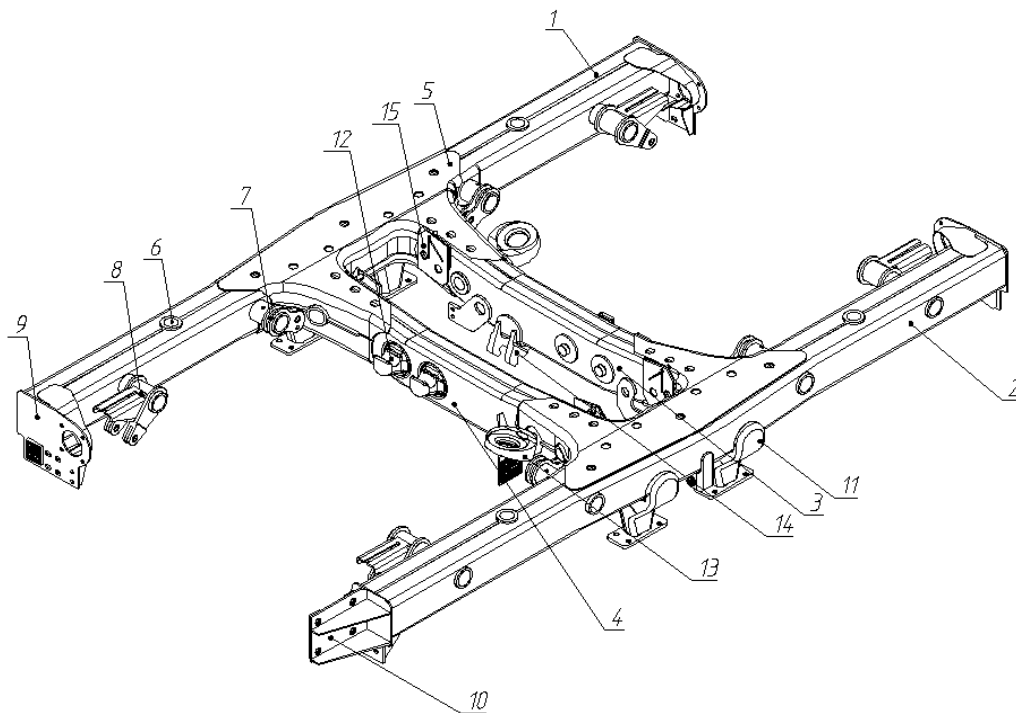
Появление вагона серии Е на Московском метрополитене было обусловлено резким ростом пассажиропотоков во второй половине 1950-х годов. Кон-

структура рамы тележки, описанная выше, являлась принципиально новой, по сравнению с предыдущей челюстной рамой тележки вагона серии Д. Внедрение новой конструкции было тяжелым. Можно отметить несколько наиболее острых проблем начального периода. Балки рам тележек вагонов серии Е первых партий изготавливались из листовой стали толщиной 8 мм, после массовых трещинообразований произведен переход на листы толщиной 10 мм. Также были проведены работы по усилению мест соединения балок посредством фигурных косынок. Серьезной проблемой являлась низкая надежность кронштейнов крепления буксовых поводков. Первоначальная литая конструкция этих кронштейнов заменена на сварноштампованный вариант с максимальным развитием периметра сварного шва приварки кронштейна с выходом шва на вертикальную стенку балки.

Прочностной расчет наиболее позднего конструктивного исполнения этих рам производился в 1966 году методом перемещений с использованием ЭВМ [96]. Результаты расчета были подтверждены усталостными стендовыми и динамическими ходовыми испытаниями. Наиболее высокие эквивалентные напряжения зафиксированы на этапе испытаний в режиме движения в кривой с возрастающей скоростью: на продольной балке в зоне концевой части верхней косынки поз. 5 (рисунок 2.4) – 95 МПа, на продольной балке в зоне концевой части нижней косынки – 124,5 МПа; в зоне приварки ребра кронштейна крепления буксовых поводков поз. 7 – 123 МПа; в сечении, проходящем по поперечной балке между верхним моторным кронштейном поз. 11 и нижним моторным кронштейном поз. 12 – 99 МПа. Напряжения не превышали допустимых $[\sigma] = 140$ МПа.

Причины высоких напряжений в этих сечениях понятны. Первое сечение располагается фактически в зоне соединения продольной и поперечной балок с действием сложного сочетания вертикальных и горизонтальных нагрузок. Второе сечение проходит по кронштейну крепления буксовых поводков, испытывающему сложные знакопеременные нагрузки, с расположением сварных швов приварки кронштейна в зоне балки с действующими напряжениями растяжения. Третье сечение расположено на поперечной балке, воспринимающей нагрузку от веса кузова и тягового привода.

Рамы тележек вагонов серий 81-717, 81-714. Продолжающееся увеличение объемов перевозок на Московском метрополитене потребовало разработки нового подвижного состава. В 1978 году началось производство вагонов серий 81-717, 81-714. Компоновочная схема рамы тележки вагонов модификаций Е и основные конструктивные решения были сохранены (рисунок 2.6).



1, 2 - продольные балки; 3, 4 - поперечные балки; 5 - верхняя усиливающая косынка; 6 - направляющая втулка буксового подвешивания; 7 - средний тормозной кронштейн; 8 - крайний тормозной кронштейн; 9 - кронштейн тормозного цилиндра; 10 - кронштейн блок-тормоза; 11 - кронштейн крепления буксовых поводков; 12 - верхний моторный кронштейн; 13 - кронштейн подвешивания редуктора; 14 - кронштейн реактивной тяги подвешивания двигателя; 15 - налчник центрального подвешивания

Рисунок 2.6 – Общий вид рамы тележки вагонов метрополитена серий 81-717, 81-714

Однако появились серьезные отличия. Во-первых, была значительно увеличена мощность тяговых электродвигателей, она составила 115 кВт (72 кВт у вагонов Е). Это привело к необходимости изменения узла подвешивания двигателей. Была разработана новая конструкция с применением двух верхних измененных моторных кронштейнов с опиранием на них двигателя через резинометаллические амортизаторы. Новый нижний моторный кронштейн перенесен на соседнюю поперечную балку с креплением двигателя через реактивную тягу. Такая

конструкция позволила снизить нагрузку на поперечные балки от вращающих моментов, создаваемых тяговыми электродвигателями.

Во-вторых, на 10 кН увеличилась вертикальная нагрузка на раму.

В-третьих, на одной из торцевых плит продольной балки рамы на специальном кронштейне стал устанавливаться новый узел – блок-тормоз. Масса консольно закрепленного блок-тормоза составляет 85 кг, на трех остальных торцевых плитах остались старые узлы – тормозные цилиндры, имеющие массу 25 кг.

Расчет рамы тележки проводился в 1978 году на этапе проектирования методом перемещений с использованием ЭВМ [95]. Был проведен требуемый объем стендовых и ходовых испытаний. Рама соответствовала требуемым нормам. Согласно результатам расчета и испытаний максимальные напряжения получены для эксплуатационного режима при движении на кривом участке пути с возрастающей скоростью: в зоне соединения балок – 130 МПа; в зоне буксового кронштейна – 120 МПа. Напряжения не превышали допускаемых $[\sigma] = 140$ МПа.

Начальный этап эксплуатации рам тележек вагонов серий 81-717/714 был связан с серьезными проблемами. Самой неприятной стала низкая надежность кронштейна подвешивания редуктора, проявлявшаяся в деформациях кронштейна и трещинообразовании. Причины этого были следующие:

- существенное увеличение нагрузок на кронштейн в связи со значительным возрастанием мощности тягового двигателя;
- исследования показали наличие бросков тока при переходных режимах работы тягового двигателя новой конструкции.

Была срочно проведена доработка конструкции двигателя и системы управления их разработчиком в лице московского завода «Динамо». Кроме того, было произведено усиление конструкции кронштейна подвешивания редуктора с изменением его размеров и вводом усиливающих фланцев на поперечной балке. Проблема критической надежности этого кронштейна была снята. Однако, надежность рам оставалась недостаточной из-за трещинообразования кронштейнов буксовых поводков.

Оценивая конструктивное исполнение рам тележек вагонов серий 81-717, 81-714, можно сказать следующее. Фактически была взята компоновочная схема рамы тележки вагонов серии Е и произведено ее дополнительное нагружение за счет увеличения статической и динамической вертикальной нагрузки, мощности тяговых двигателей, нагружения одной из продольных балок дополнительной массой блок-тормоза.

В связи с недостаточной надежностью был проведен ряд дополнительных испытаний, например [106], которые показали:

- наличие напряжений выше допускаемых в зоне соединения кронштейнов крепления буксовых поводков с продольными балками от 156 до 195 МПа при $[\sigma] = 140$ МПа;

- минимальные значения запасов усталостной прочности зон соединения поводковых кронштейнов с балкой рамы составляют от 0,73 до 1,62, что ниже нормативного значения $[n] = 1,7$ согласно [64], в настоящий момент $[n] = 2,0$.

Недостаточная надежность средних кронштейнов крепления буксовых поводков, как и на раме тележки вагонов серии Е, было связано с сохранением конструктивного расположения сварных швов приварки кронштейна в зоне деформаций растяжения продольных балок.

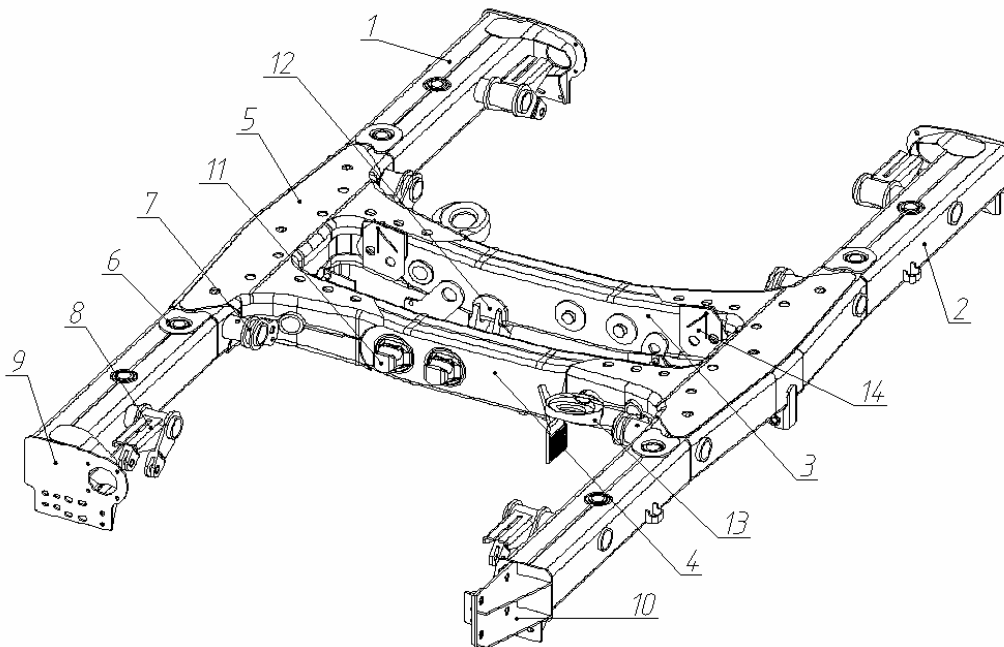
Рамы тележек вагонов серий 81-717.5, 81-714.5 и модификаций. При разработке новой конструкции вагона была поставлена задача модернизации конструкции тележки. На тот момент времени (вторая половина 1980-х годов) конструкторско-технологические мероприятия по повышению надежности поводкового узла связи колесной пары с рамой тележки были исчерпаны. Было принято принципиальное решение, сохранив компоновочную схему тележки, перейти на шпиртонный узел связи колесной пары с рамой тележки. Данное решение было обусловлено следующими соображениями:

- 1 В стране имелась высокая потребность в тележках вагонов метрополитена с наличием их дефицита. Это было связано с сильным ростом имевшихся метрополитенов и строительством новых. Кроме того, часть мощностей машиностроительных заводов была задействована на выполнение заказов зарубежных метро-

политенов. В таких условиях изменить принципиально конструкцию тележки и рамы тележки означало фактически нарушить весь имевшийся производственно-технологический цикл со срывом задания правительства.

2 Переход на буксовый шпинтонный узел (узел поступательной пары с цилиндрическими направляющими) казался на тот момент наиболее оптимальным путем модернизации. Во-первых, наличие степени свободы в вертикальном направлении позволяет снизить деформации и напряжения, присущие поводковой конструкции. Во-вторых, взаимная фиксация рамы тележки и колесной пары через шпинтоны по горизонтальным осям позволяет снизить деформации рамы тележки, увеличить ресурс буксовых подшипников и повысить надежность буксового узла колесной пары.

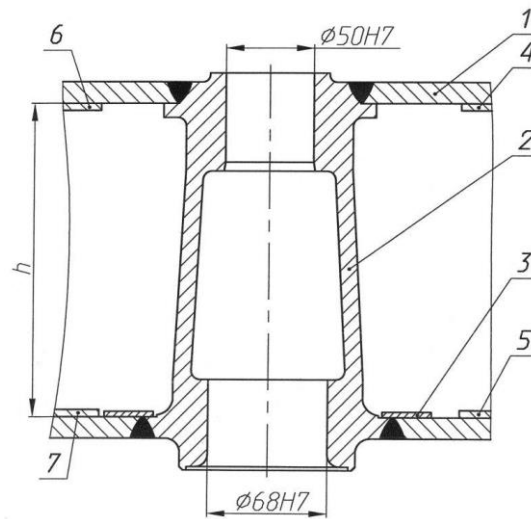
Серийное производство вагонов серий 81-717.5/714.5 начато в 1989 году, модификации этих вагонов производятся по настоящее время. Вагоны этих серий являются самой многочисленной группой в структуре отечественных метрополитенов. Общий вид рамы тележки приведен на рисунке 2.7.



1, 2 - продольные балки; 3, 4 - поперечные балки; 5 - верхняя усиливающая косынка; 6 - шпинтонная втулка; 7 - средний тормозной кронштейн; 8 - крайний тормозной кронштейн; 9 - кронштейн тормозного цилиндра; 10 - кронштейн блок-тормоза; 11 - верхний моторный кронштейн; 12 - кронштейн реактивной тяги подвешивания двигателя; 13 - кронштейн подвешивания редуктора; 14 - наличник центрального подвешивания

Рисунок 2.7 – Общий вид рамы тележки вагонов метрополитена серий 81-717.5, 81-714.5

Принципиальным отличием рамы тележки от предыдущей конструкции является наличие на каждой продольной балке четырех шпигонных втулок. Конструкция шпигонной втулки показана на рисунке 2.8.



1 - продольная балка; 2 - шпигонная втулка; 3 - технологическая подкладка; 4, 5, 6, 7 - технологические подкладки балки

Рисунок 2.8 – Конструкция шпигонной втулки сварноштампованной рамы тележки (шпигон не показан)

Прочностной расчет рамы производился на этапе проектирования [93], был выполнен весь объем стендовых и динамических ходовых испытаний. Рама тележки соответствовала требуемым нормам. Однако фактически сразу после начала эксплуатации начали выявляться массовые случаи трещинообразования шпигонных втулок по верхнему и нижнему кольцевым сварным швам. Усредненный пробег до возникновения усталостной трещины по данным на 1992-09-01 составлял 411 тыс. км, то есть не обеспечивался даже гарантийный пробег производителя, равный 480 тыс. км. Проведенные исследования показали наличие грубых нарушений технологии на стадии производства. В частности были выявлены:

- непровары продольного шва (сварка коробок балки) в зоне сопряжения кругового и продольного сварных швов;
- отсутствие технологических подкладок поз. 3 (рисунок 2.8), обеспечивающих нормальное образование корня шва; в ряде случаев выявлены нечертежные подкладки, установленные с зазором;

- зачистка продольного шва под установку технологической прокладки с уменьшением сечения металла в этой зоне с 10 до 4 мм.

С целью повышения надежности шпинтонного узла были проведены работы по отработке технологического процесса и ужесточен технический контроль. Разработан ряд конструктивных мероприятий: введена двусторонняя разделка кромок под верхний кольцевой шов (первоначально разделка была только со стороны втулки); изменена геометрия сварных швов; введены новые зоны ультразвукового контроля; вместо литой втулки низкого качества внедрена цельносварная втулка; верхние кольцевые швы средних шпинтонных втулок усилены накладками. Для рам тележек, находящихся в эксплуатации, были разработаны технологии ремонта и усиления конструкции.

Кроме того, в 1992 году были произведены усталостные стендовые испытания трех рам тележек [32]. Вначале были испытаны две рамы тележки, бывшие в эксплуатации, которые имели трещины и были отремонтированы. Во время ремонта дефектные шпинтонные узлы были заменены новыми, а трещины разделаны и заварены. Третья рама была новой, изготовленной с учетом описанных выше конструкторско-технологических улучшений.

Наибольший уровень суммарных напряжений был замерен в месте соединения продольной и поперечной балок $\sigma = 136,5$ МПа, что ниже $[\sigma] = 140$ МПа. Максимальный уровень суммарных напряжений в зоне внутренних шпинтонов составил 100 МПа.

Испытания рам проводились до разрушения, после чего разрушенное место блокировалось накладками и испытания продолжались. Все разрушения были в зоне пересечения кольцевого сварного шва внутренней шпинтонной втулки с продольным швом балки. По результатам металлографического анализа усталостные трещины начинались от корня сварного шва на границе шва с втулкой. Разрушения произошли: на первой раме по нижним кольцевым швам, на второй раме вначале по верхнему кольцевому шву, затем по нижнему. На третьей модернизированной раме разрушения произошли вначале по верхнему кольцевому шву, затем по нижнему (рисунок 2.9).

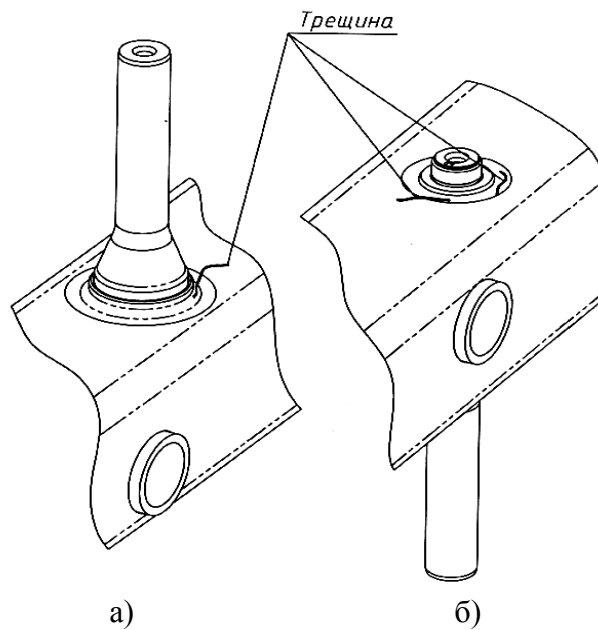


Рисунок 2.9 – Трещинообразование шпинтонных втулок:
а) по нижнему кольцевому шву; б) по верхнему кольцевому шву

Результаты сравнительных испытаний показали, что долговечность рамы с конструктивно-технологическими улучшениями увеличилась по верхней полке шпинтонной втулки в 2 раза, а по нижней полке – в 1,6 раза. После внедрения этих улучшений надежность рам тележек существенно возросла. С 1995 до середины 2003 года количество отказов шпинтонных рам тележек оставалось на уровне поводковых рам тележек.

У разработчиков конструкции и метрополитенов сложилось мнение, что трещинообразование шпинтонных рам тележек были связаны только с производственно-технологическими причинами. Однако, ситуация резко ухудшилась после разрушения 2003-06-09 шпинтонной рамы тележки на перегоне станции «Новокузнецкая» – «Театральная» Московского метрополитена. У рамы тележки вагона серии 81-717.5М произошел излом продольной балки в зоне средней шпинтонной втулки со стороны блок-тормоза (рисунок 2.10).

Место разрыва балки проходило между верхней косынкой и усиливающей накладкой шпинтонной втулки. Аварийная рама тележки находилась в эксплуатации 10 лет, пробег с начала эксплуатации составил 1 706 880 км. Согласно заключению независимой комиссии трещина носила усталостный характер, причиной возникновения которой была высокая концентрация напряжений, вызванных

близким расположением (фактически неплавным слиянием) двух сварных швов приварки накладки и косынки. В ограниченной зоне балки, имеющей сосредоточение сварных швов, возникли остаточные, в том числе и растягивающие напряжения. Переменные напряжения большой величины, обусловленные значительной концентрацией напряжений и действующие в зоне высоких остаточных напряжений, привели к усталостному повреждению конструкции. При этом комиссией отмечено, что ремонт был произведен неизвестным предприятием без отметки в формуляре и с нарушением требований ремонтных чертежей, что фактически и привело к появлению концентратора напряжений.

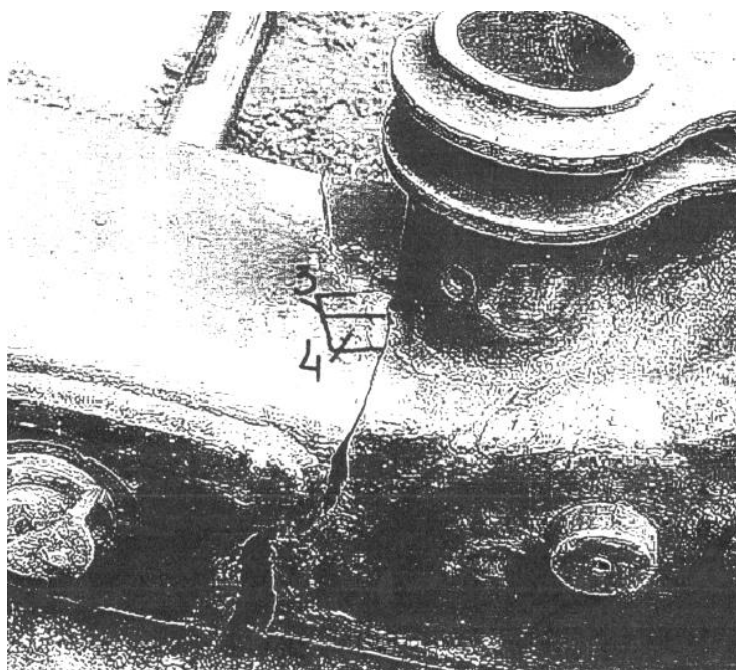


Рисунок 2.10 – Фрагмент фотографии разрушенной шпиртонной рамы тележки

Данный аварийный случай стал началом резкого обострения ситуации с трещинообразованием шпиртонных рам тележек на Московском метрополитене, а также ряде других метрополитенов России и ближнего зарубежья – Санкт-Петербургском, Харьковском, Минском, Киевском. Стало понятно, что часть парка шпиртонных рам тележек достигла предельного состояния. Была поставлена под угрозу безопасность движения.

По результатам анализа отказов рам тележек был введен назначенный ресурс шпиртонных рам тележек – 1,5 млн км пробега, по достижении которого рамы списываются в Москве из эксплуатации независимо от их технического со-

стояния. Началось массовое списание рам и резкое возрастание объемов производства новых рам тележек для замены списанных. Также был ужесточен контроль за производством, эксплуатацией и ремонтом рам тележек. С другой стороны были начаты работы, которые пошлы по четырем основным направлениям:

- анализ имеющихся конструкций и технологий, разработка конструкторско-технологических мероприятий;
- повторные прочностные расчеты существующей конструкции;
- стендовые усталостные испытания существующей конструкции;
- динамические ходовые испытания одного из составов, находящихся в эксплуатации на Московском метрополитене.

Рассмотрим основные результаты конструкторско-технологического анализа проблемного узла рамы. Продольная балка состоит из двух штампованных швеллерообразных коробок, сваренных встык. Для качественного сварного соединения требуется произвести состыкованность коробок по высоте. Фактически речь идет о подборе двух коробок почти 4-х метровой длины по высоте с возможным превышением кромки одной коробки над другой не более чем на 2,5 мм (согласно требованиям чертежа), что не всегда осуществляется. Повысить точность коробок по высоте могли бы технологические мероприятия: замена изношенных штампов на новые и ввод калибровочных штампов.

Следующим обстоятельством является качественная сварка двух коробок в зоне шпунтовых втулок. Для качественного провара требуется наличие технологических подкладок (рисунок 2.8). Однако после сварки коробок и формирования продольной балки требуется выполнение механической обработки отверстий под установку шпунтовых втулок. Выполняется это так. На одной из коробок балки приварены 10 технологических остающихся подкладок (пять сверху и пять снизу), расположенных с разрывами в зонах обработки отверстий под втулки. Зоны без подкладок должны свариваться согласно требованиям чертежей на съемных подкладках. Фактически это не выполнялось, хотя были технологические попытки подварить корень сварного шва низкого качества после обработки отверстий. Таким образом, в зоне шпунтовых втулок, оставалась зона некаче-

ственно проваренного шва. Далее, после обработки отверстий под втулку, производится замер фактического размера h продольной балки. Под этот размер обрабатывается шпинтонная втулка. Затем внутри балки устанавливается технологическая подкладка поз. 3 и приваривается ручной сваркой через отверстие в раме. Затем в раму вваривается шпинтонная втулка. Механическая обработка втулок под запрессовку шпинтонов производится позднее в сваренной раме.

Из вышесказанного понятна производственно-технологическая сложность изготовления сварноштампованных рам тележек и высокое влияние человеческого фактора на качество. Эти обстоятельства сводят на нет теоретическое преимущество штампованных рам, связанное с меньшим количеством сварных швов (по сравнению с листовыми рамами).

Был проведен новый расчет [15] с использованием МКЭ. Распределение напряжений для режима нагружений Па (разгон до конструкционной скорости) показано на рисунке 2.11. Максимальные эквивалентные напряжения, превышающие допускаемые $[\sigma] = 140$ МПа, получены в зоне среднего шпинтона со стороны кронштейна блок-тормоза – 185 МПа (режим Па) и в зоне кронштейна редуктора – 135 МПа (режим Пб – трогание с места).

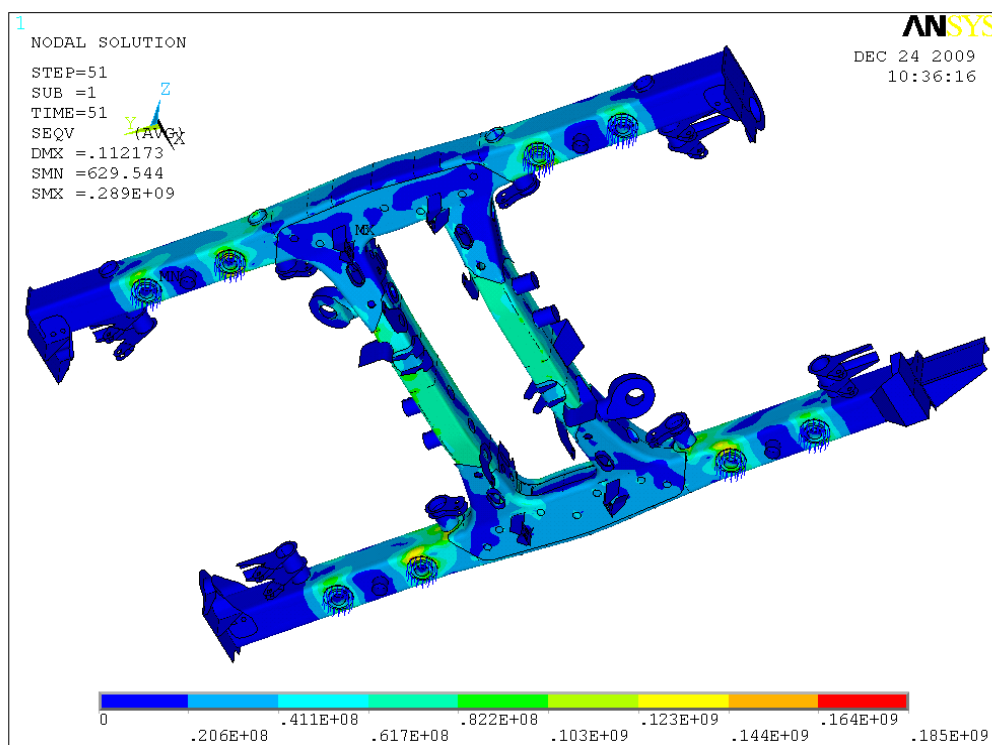


Рисунок 2.11 – Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в элементах сварноштампованной рамы тележки вагонов серий 81-717.5, 81-714.5, Па

Проведенные ходовые динамико-прочностные испытания [30] также показали наличие высоких напряжений и недостаточное сопротивление усталости шпиронного узла. Результаты предыдущих расчетов и испытаний не показывали наличие таких напряжений. Очевидно, это связано с комплексом причин, часть которых приведена ниже:

- применен более совершенный расчетный комплекс с использованием метода конечных элементов;

- по результатам эксплуатации, экспериментов и испытаний накоплен большой объем информации, который в совокупности с более совершенными расчетными методами позволил построить адекватную расчетную математическую модель, более приближенную к реальным режимам нагружений;

- за 15 лет, прошедших после проектирования и первых испытаний, конструкция и технология изготовления вагона и тележки существенно изменились, что не могло не повлиять на напряженное состояние рамы тележки;

- динамико-прочностным испытаниям, проведенным в 1987-1988 годах, подвергался опытный состав вагонов нового изготовления, а в 2003 году проводились испытания новых вагонов, то есть имевших определенные износы и деформации (поэтому испытания 2003 года более приближены к реальным эксплуатационным режимам нагружений).

Таким образом, был поставлен вопрос о необходимости существенной модернизации конструкции рамы тележки вагонов серий 81-717.5/714.5 с целью обеспечения требуемых прочностных характеристик.

При разработке новой концепции были приняты следующие принципиальные решения:

- бесперспективность модернизации сварноштампованной конструкции для сильнозагруженных метрополитенов, прежде всего Московского;

- необходимость сохранения присоединительных мест старой конструкции с целью возможности ремонтного переформирования тележек, находящихся в эксплуатации, с заменой рам тележек на новую конструкцию.

Новая конструкция рамы тележки была разработана на ОАО «Метровагон-маш», прошла весь объем требуемых испытаний. Серийное производство этой рамы началось в 2008 году. Общий вид новой рамы приведен на рисунке 2.12. Рама шпунтованная, коробчатого сечения, то есть в каждом сечении сварена из четырех листов (рисунок 2.13).

Материал шпунтованной листовой рамы тележки – низколегированная сталь 09Г2Д, имеющая более высокие механические характеристики по сравнению со сталью 20. После сварки, перед механической обработкой, рама подвергается термообработке (отжигу) для уменьшения внутренних остаточных напряжений, возникающих после сварки, и повышения усталостной прочности сварных швов.

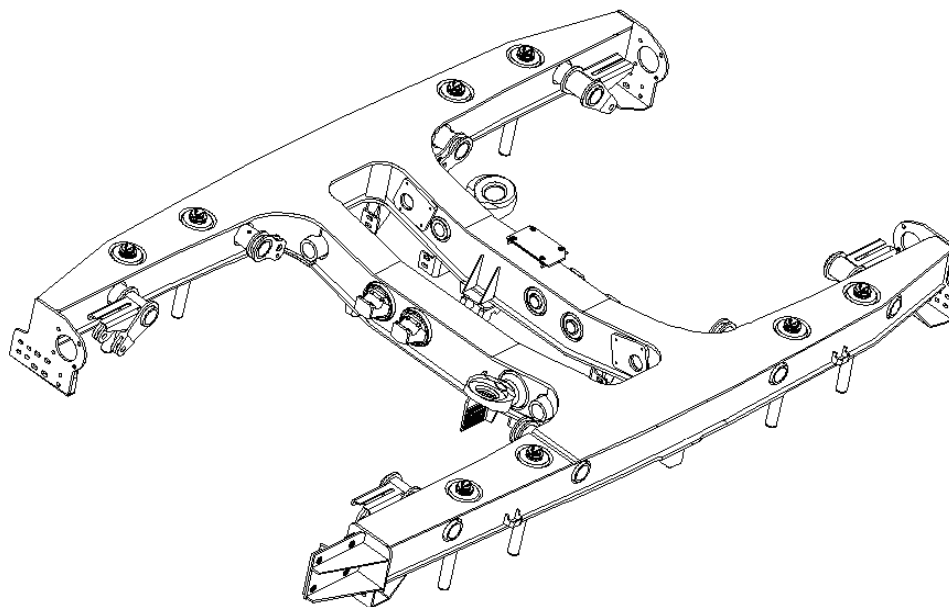


Рисунок 2.12 – Общий вид листовой рамы тележки вагонов метрополитена серий 81-717.5, 81-714.5 (все присоединительные конструктивные элементы аналогичны рисунку 2.7)

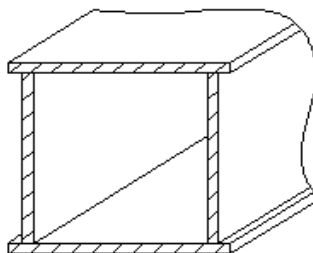


Рисунок 2.13 – Сечение балок рам тележек листовой конструкции

Решение о выборе листовой конструкции рамы тележки, обусловлено следующими соображениями:

- более высокая технологичность подобной конструкции (прежде всего возможность снижения объема ручной сварки и повышение автоматической);
- простота изготовления шпинтонного узла, фактически втулка закрыта двумя горизонтальными листами и приварена;
- возможность строить сечения балок в соответствии с действующими нагрузками, используя возможности применения стальных листов разной толщины, изменения конфигурации листов и балок;
- накопленный положительный опыт конструирования, изготовления и эксплуатации листовых рам тележек вагонов новых моделей.

Расчет произведен с использованием МКЭ [15]. Распределение эквивалентных напряжений для эксплуатационного режима Па приведено на рисунке 2.14.

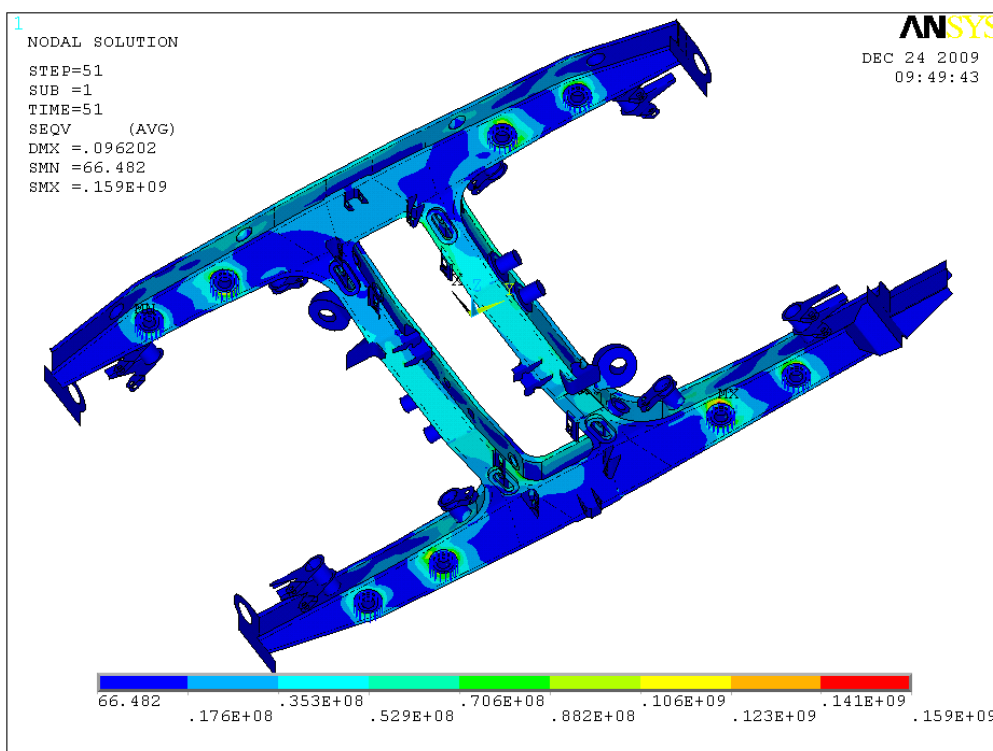


Рисунок 2.14 – Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в элементах листовой шпинтонной рамы тележки вагонов серий 81-717.5, 81-714.5 и модификаций, Па

Максимальные напряжения действуют в зонах: средней шпинтонной втулки со стороны кронштейна блок-тормоза – 159 МПа (режим Па), кронштейна редуктора – 135 МПа (режим Пб). Результаты проведенных испытаний [81], [105]

подтвердили данные значения. Таким образом, максимальные напряжения не превышают допускаемых (для стали 09Г2Д $[\sigma] = 180$ МПа).

С апреля 2008 года вагоны серий 81-717.5М/714.5М, а позже серий 81-717.6/714.6 изготавливаются для Московского метрополитена с листовыми рамами тележек. Весной 2010 года на Мосметрополитене было принято решение: при списании рам тележек, а также при капитальном ремонте вагонов производить замену сварноштампованных рам (поводковых и шпинтонных) на шпинтонные листовые. Это решение распространяется только на вагоны метро серий 81-717/714, 81-717.5/714.5 и модификации (вагоны модификаций серии Е подлежат списанию). Таким образом, в Москве начаты работы по переводу вагонов старых серий на шпинтонные тележки с листовыми рамами.

Рамы тележек вагонов метрополитена моделей 81-720, 81-721 и модификаций («Яуза»). Рама тележки для этих вагонов была разработана в начале 1990-х годов. Был проведен ряд расчетов и испытаний, включая эксплуатационные испытания опытного состава. В 1998 году на Московском метрополитене начата эксплуатация вагонов этих моделей.

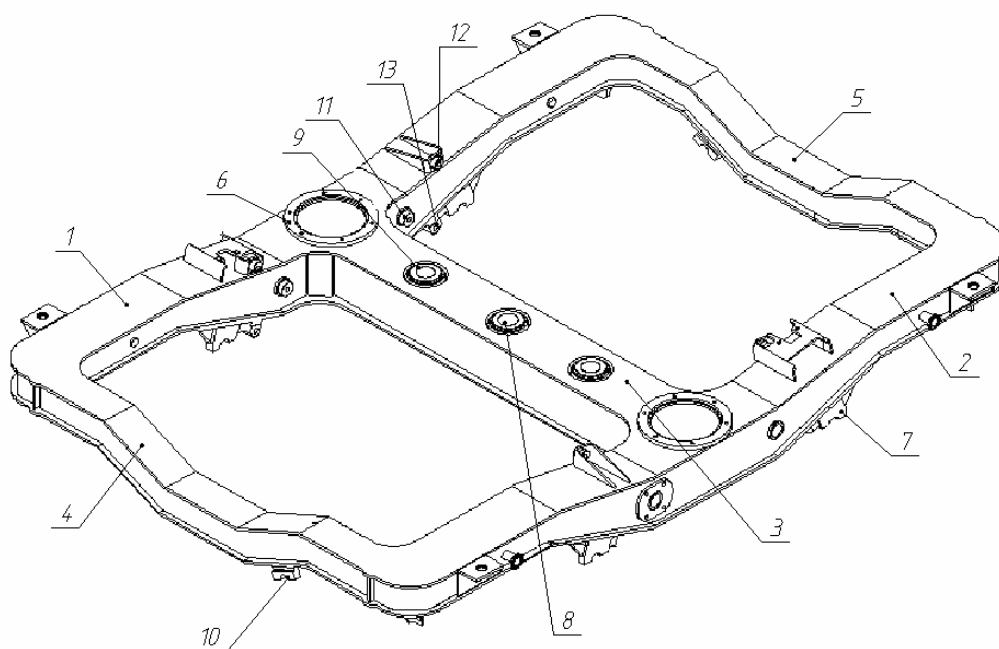
Общий вид рамы тележки приведен на рисунке 2.15. Рама сварной конструкции замкнутой конфигурации с двумя продольными балками, одной центральной и двумя концевыми. Все балки листовой конструкции (рисунок 2.13). Материал рамы – сталь 09Г2Д. Масса рамы тележки 1050 кг. После сварки рама тележки подвергается термообработке. На продольных балках имеются кронштейны для соединения с шарнирно-рычажным механизмом букс, тормозные кронштейны, опоры пневматических рессор, кронштейны крепления гидравлических гасителей колебаний. На центральной балке вварены три втулки – две крайние под установку узла подвешивания тягового привода, центральная втулка – под запрессовку шкворня узла связи кузова с тележкой. На концевых балках имеется кронштейн, представляющий третью точку подвешивания тягового привода.

Основные конструктивные решения рамы определялись конструкцией тележки, спроектированной по заданию правительства для планируемых в то время скоростных радиальных линий Московского метрополитена, соединяющих центр

столицы с отдаленными районами города и ближним Подмосковьем (для движения со скоростями не менее 120 км/ч). Поэтому для уменьшения динамических нагрузок был разработан тяговый привод третьего класса, что в значительной степени определяет конструкцию рамы тележки.

Второй особенностью рамы тележки является шарнирно-рычажная связь колесной пары с рамой тележки, определившая конструкцию буксового кронштейна рамы. Этот выбор был связан с желанием отойти от кинематически сложных поводковых и шпинтонных схем, имеющих наличие большого количества деталей, поверхностное трение, большие эксплуатационные затраты.

Третья особенность рамы связана с относительной простотой конструкции, технологичностью, достаточными прочностными характеристиками, что определено в свою очередь выбором листовой конструкции, как более технологичной; применением стали 09Г2Д с более высокими механическими характеристиками по сравнению со сталью 20; термообработкой рамы.



1, 2 - продольные балки; 3 - центральная балка; 4, 5 - концевые балки; 6 - опорная плита пневморессоры; 7 - буксовый кронштейн (крепление рычага буксы); 8 - втулка шкворня связи кузова с тележкой; 9 - втулка подвешивания тягового привода; 10 - кронштейн подвески тягового привода; 11 - средний тормозной кронштейн крепления блок-тормоза; 12 - верхний тормозной кронштейн; 13 - нижняя точка крепления блок-тормоза (на буксовом кронштейне)

Рисунок 2.15 – Общий вид рамы тележки вагонов метрополитена моделей 81-720, 81-721 (81-740, 81-741) и модификаций

Расчет производился с использованием МКЭ [94]. Максимальные эквивалентные напряжения определены в зоне приварки буксового кронштейна со стороны крепления рычага буксы: для расчетного режима IIa – 141,6 МПа, для режима IIб – 118,4 МПа. В зоне соединения продольной и центральной балок напряжения составляют для режима IIa 74,8 МПа, для режима IIб – 64,1 МПа. Таким образом, максимальные напряжения не превышают $[\sigma] = 180$ МПа. Испытания подтвердили эти значения и требуемое сопротивление усталости.

По состоянию на начало 2012 года максимальный пробег вагонов этих моделей составил свыше 800 тыс. км. Усталостных повреждений не выявлено. Имевшие место дефекты были связаны в основном с производственными дефектами в виде грубых нарушений технологических процессов. Тем не менее конструкция рамы подвергалась модернизации по результатам испытаний, производства, эксплуатации, доработки других узлов тележки. В частности, модернизировались кронштейны крепления гасителей колебаний. Кроме того, существенно изменена конструкция продольной балки рамы тележки и буксового кронштейна (по результатам испытаний).

Рамы тележек вагонов метрополитена моделей 81-740, 81-741 и модификаций («Русич»). Вагоны спроектированы на ОАО «Метровагонмаш» для линий «легкого метро». Проведен требуемый объем стендовых и динамико-прочностных испытаний. Эксплуатация начата в 2004 году на новой Бутовской линии Московского метрополитена. Общий вид моторных рам тележек этих вагонов схож с рамами тележек вагонов 81-720 (рисунок 2.15). Имеющиеся конструктивные отличия для данного исследования не принципиальны. Гораздо более важным является изменение режимов нагружения, связанное прежде всего с двумя обстоятельствами:

- увеличение мощности тяговых электродвигателей со 120 (вагоны 81-720/721) до 170 кВт (вагоны 81-740/741);
- уменьшение на 40 кН вертикальной статической нагрузки на раму.

Это привело к изменению распределения напряжений в раме (рисунок 2.16). Максимальные напряжения, не превышающие допускаемых, выявлены в

зонах: соединения продольной и центральной балок – 138 МПа, буксового кронштейна – 105 МПа [91]. По состоянию на начало 2012 года максимальный пробег, достигнутый вагонами этих моделей, около 800 тыс. км. Усталостных повреждений не выявлено. Имевшие место дефекты также, как и на вагонах 81-720, 81-721, были связаны с производственно-технологическими причинами.

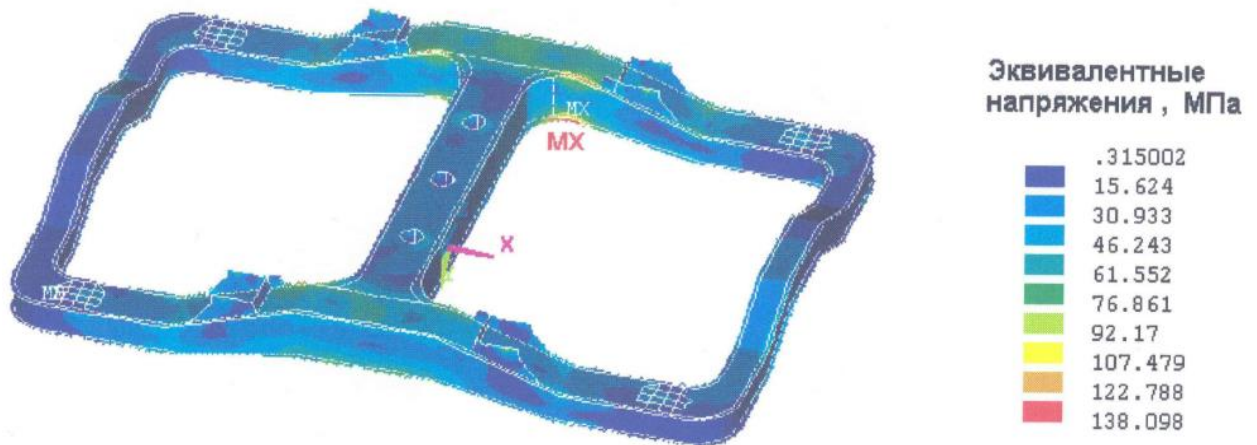


Рисунок 2.16 – Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в элементах моторной рамы тележки вагонов моделей 81-740, 81-741, Па

2.3 Построение статистических моделей и определение показателей надежности рам тележек вагонов Московского метрополитена

В параграфе 2.1 было обосновано принятие Московского метрополитена в качестве базового для изучения результатов эксплуатации рам тележек.

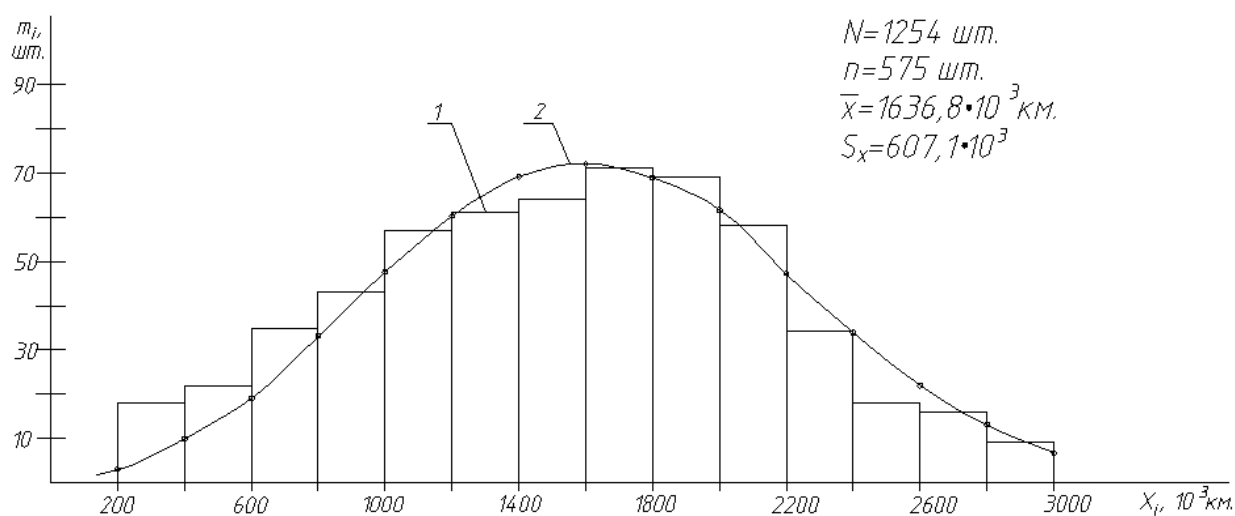
В качестве исходных данных принимаются статистические данные, собранные диссертантом. Наблюдению подвергался весь инвентарный парк рам тележек Московского метрополитена в течение календарного 2010 года путем фиксирования и изучения каждого случая отказа рам тележек. Информация собиралась по всем электродепо и ремонтным заводам, причастным к эксплуатации и ремонту рам тележек. Под отказом подразумевается событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния рамы. Как правило, это трещинообразование (любое) или деформация выше допустимого нормативного значения. Статистические данные сведены в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Статистические данные по отказам рам тележек инвентарного парка Московского метрополитена за 2010 год

Группа рам тележек	Кол-во рам тележек инвентарного парка	Кол-во ремонтов	Кол-во списаний по техническому состоянию	Общее кол-во отказов
Модификации серии Е	1254	303	272	575
Серии 81-717/714	1976	352	83	435
Серии 81-717.5/714.5 и модификации	3700	608	118	726
Итого	6930	1263	473	1736

Отказов рам тележек вагонов новых моделей 81-720/721, 740/741 за календарный 2010 год не выявлено. Ниже приведены результаты работы по построению статистических моделей и расчету параметров надежности рам тележек вагонов старых серий. Методика расчета приведена в Приложении А.

Данные наблюдений о наработках до отказа рам тележек модификаций вагона Е приведены на рисунке 2.17 в виде упорядоченного по интервалам ряда эмпирического распределения (гистограммы). Методами математической статистики определен вид закона распределения наработки до отказа рам тележек этой группы. Эмпирическое распределение с вероятностью до 0,95 аппроксимируется законом распределения Вейбулла-Гнеденко.



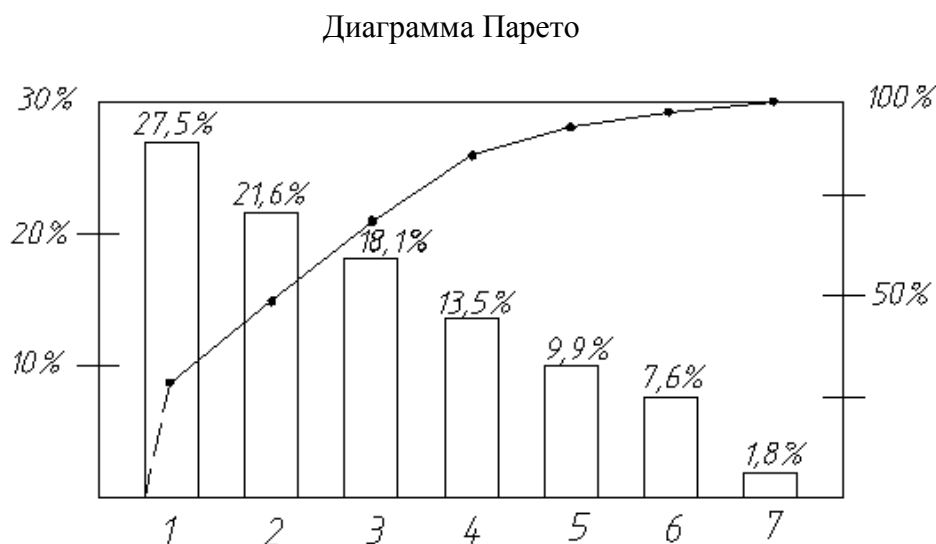
1 - эмпирическое распределение; 2 - расчетное распределение (закон Вейбулла-Гнеденко)

Рисунок 2.17 – Распределение наработки до отказа поводковых рам тележек модификаций серии Е

Функция плотности вероятности распределения наработки до отказа рам тележек модификаций серии Е имеет вид

$$\varphi(x) = 2,95 \cdot 0,545 \cdot 10^{-6} x^{1,95} \exp(-0,545 \cdot 10^{-6} x)^{1,95}.$$

Среднее значение наработки до отказа рам тележек модификаций Е составляет $1636,8 \cdot 10^3$ км при введенном на Мосметрополитене назначенном ресурсе для этих рам $3000 \cdot 10^3$ км пробега. Оценка отказов в зависимости от места их возникновения приведена в виде диаграммы Парето (рисунок 2.18). Из информации, представленной на диаграмме, следует, что 49,1 % отказов приходится на два узла: наличники центрального подвешивания и поводковые кронштейны.

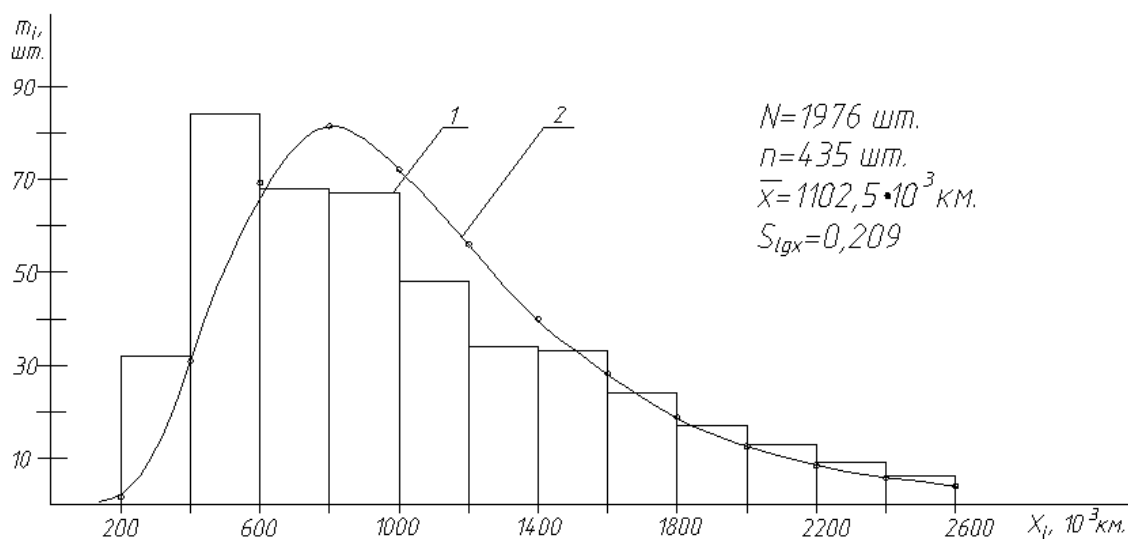


1 - наличники центрального подвешивания; 2 - поводковый кронштейн; 3 - верхний моторный кронштейн; 4 - деформации рам; 5 - нижний моторный кронштейн; 6 - кронштейн редуктора; 7 - прочие отказы

Рисунок 2.18 – Распределение отказов рам тележек вагонов метрополитена модификаций серии Е по месту возникновения

Перейдем к рамам тележек вагонов серий 81-717/714. Гистограмма эмпирического распределения и график функции плотности вероятности теоретического распределения наработки до отказа приведены на рисунке 2.19. С вероятностью до 0,95 эмпирическое распределение аппроксимировано логарифмически-нормальным законом. Расчетом получен следующий вид функции плотности вероятности распределения наработки до отказа

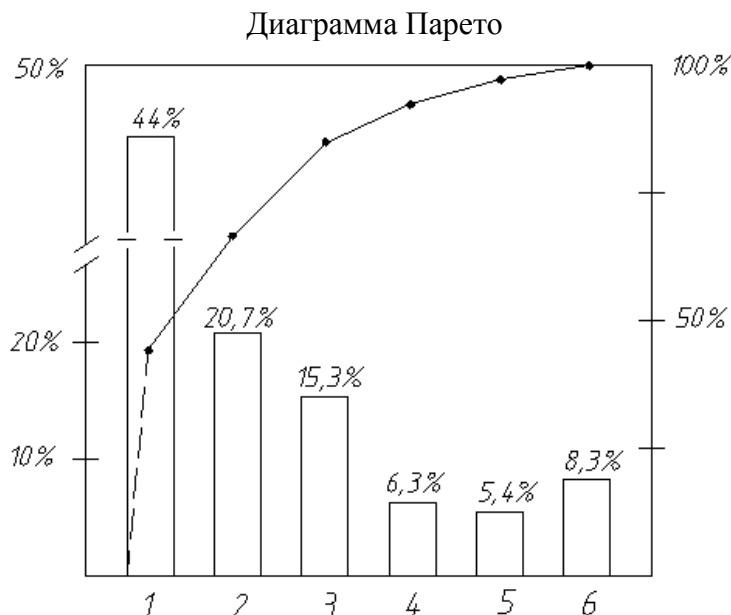
$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,209x} \exp\left[-\frac{(\lg x - 2,998)^2}{2 \cdot 0,209^2}\right].$$



1 - эмпирическое распределение; 2 - расчетное распределение (логарифмически-нормальный закон)

Рисунок 2.19 – Распределение наработки до отказа поводковых рам тележек вагонов серий 81-717/714

Среднее значение наработки до отказа рам тележек вагонов серий 81-717/714 составляет $1102,5 \cdot 10^3$ км при назначенном ресурсе для этих рам $2500 \cdot 10^3$ км пробега. Наибольшее количество отказов (64,7 %) приходится на поводковые кронштейны и наличники центрального подвешивания (рисунок 2.20).

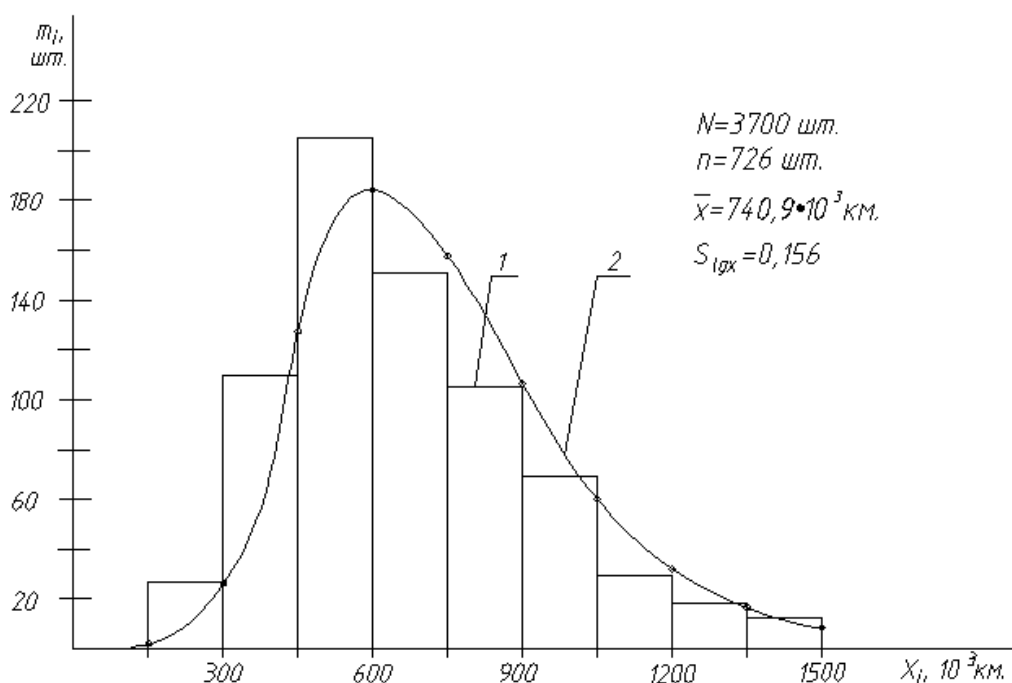


1 - поводковый кронштейн; 2 - наличники центрального подвешивания; 3 - верхний моторный кронштейн; 4 - зона окна центрального подвешивания; 5 - кронштейн редуктора; 6 - прочие отказы

Рисунок 2.20 – Распределение отказов рам тележек вагонов метрополитена серий 81-717/714 по месту возникновения

Гистограмма эмпирического распределения и график функции плотности вероятности теоретического распределения наработки до отказа для шпинтонных рам тележек (сварноштампованной конструкции) вагонов серий 81-717.5/714.5 и модификаций приведены на рисунке 2.21. Среднее значение наработки до отказа составляет $740,9 \cdot 10^3$ км при введенном в Москве назначенном ресурсе для этих рам $1500 \cdot 10^3$ км пробега. С вероятностью до 0,95 эмпирическое распределение согласуется с логарифмически-нормальным законом. Определен следующий вид функции плотности вероятности распределения наработки до отказа

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,156x} \exp\left[-\frac{(\lg x - 2,843)^2}{2 \cdot 0,156^2}\right].$$

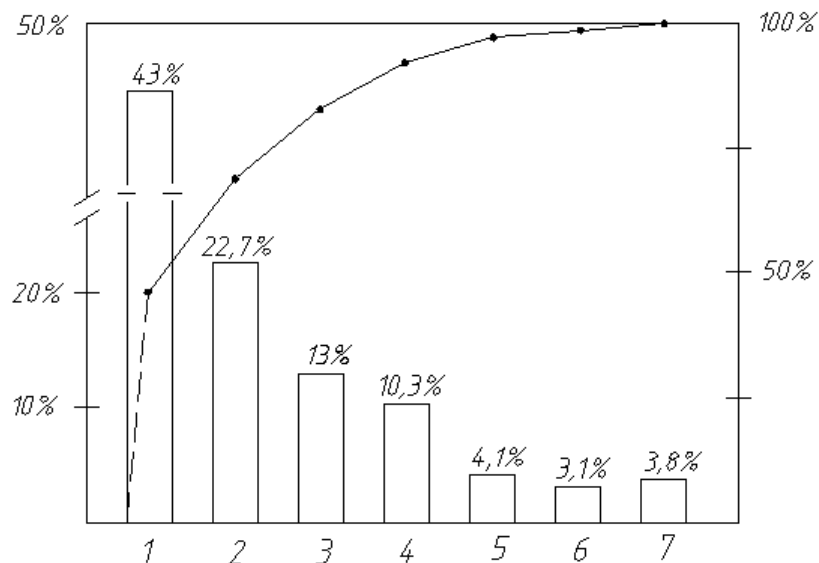


1 - эмпирическое распределение (гистограмма); 2 - расчетное распределение (логарифмически-нормальный закон)

Рисунок 2.21 – Распределение наработки до отказа шпинтонных рам тележек вагонов метрополитена серий 81-717.5/714.5 и модификаций

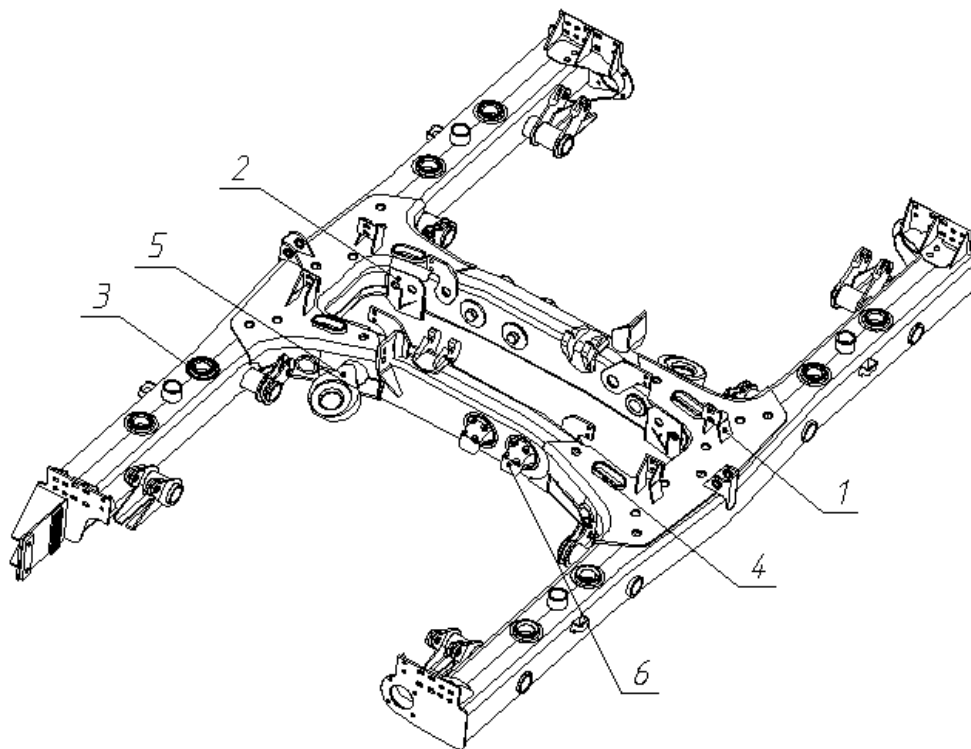
Процентное распределение отказов по местам их возникновения приведено на рисунке 2.22. Наибольшее количество отказов (65,7 %) приходится на кронштейны предохранительных скоб центрального подвешивания и наличники центрального подвешивания. Характерные места трещинообразования показаны на рисунке 2.23.

Диаграмма Парето



1 – кронштейны предохранительных скоб центрального подвешивания; 2 – наличники центрального подвешивания; 3 - шпиронные втулки; 4 - зона окна центрального подвешивания; 5 - кронштейн редуктора; 6 - верхний моторный кронштейн; 7 - прочие дефекты

Рисунок 2.22 – Распределение отказов рам тележек вагонов метрополитена серий 81-717.5/714.5 и модификаций по месту возникновения



1 - кронштейн предохранительных скоб центрального подвешивания; 2 - наличник центрального подвешивания; 3 - шпиронная втулка; 4 - окно центрального подвешивания; 5 - кронштейн редуктора; 6 - верхний моторный кронштейн

Рисунок 2.23 – Характерные места трещинообразования рам тележек вагонов серий 81-717.5/714.5 и модификаций (показана нижняя часть рамы)

Результаты, полученные в параграфе 2.3 настоящей работы, имеют следующую научную и прикладную ценность:

1 Построенные статистические модели позволяют прогнозировать показатели надежности рам тележек, прежде всего вероятность их безотказной работы в зависимости от наработки.

2 Предыдущие исследования надежности рам тележек метровагонов были выполнены относительно давно [42], [85]. Поэтому в этих работах не исследуются шпинтонные рамы тележек. Кроме того, проведенная работа позволяет несколько изменить сложившееся представление о ненадежных узлах рам тележек. В 1980-е годы, у рам тележек вагонов серии Еж 90 % всех отказов было обусловлено отказами трех узлов: поводковых кронштейнов, нижних и верхних моторных кронштейнов. У рам тележек вагонов 81-717/714 наименее надежными узлами были поводковые и верхние моторные кронштейны. У шпинтонных рам тележек вагонов 81-717.5/714.5 согласно статистическим данным Московского метрополитена за период с 1997 по 2003 годы в среднем 76 % отказов составляли трещины шпинтонных втулок. Согласно проведенному исследованию в настоящее время существенную долю отказов составляют элементы рам, связанные с центральным рессорным подвешиванием: наличники центрального подвешивания, кронштейны предохранительных скоб, окна центрального подвешивания.

2.4 Результаты эксплуатации рам тележек на метрополитенах России

В параграфе 2.3 изучались результаты эксплуатации рам тележек на Московском метрополитене. Однако, параметры надежности рам тележек связаны с условиями эксплуатации. Поэтому для получения объективной картины требуется изучить и проанализировать ситуацию на других метрополитенах России. Данные по отказам и показатели работы метрополитенов, влияющие на параметры надежности рам тележек, собраны и приведены в таблице 2.6. Данные получены от Управлений соответствующих метрополитенов. В таблице приведена информация только по инвентарному парку рам тележек вагонов старых серий.

Таблица 2.6 – Статистические данные по метрополитенам России за 2010 год

Название метрополитена	Кол-во рам тележек парка вагонов старых серий	Общее кол-во отказов	Среднегодовой пробег вагона, км	Максимально достигнутые пробеги рам тележек, 10 ³ км	Максимальная населенность вагона в час пик, человек	Оценка (средняя) состояния рельсового пути, балл/км	Минимальный интервал времени между поездами, с
Московский	6930	1736	160 000	В соответствии с назначенным ресурсом от 1500 до 3000	235	10,7	95
Санкт-Петербургский	3101	374	135 000	2 170 (вагоны 81-717); 3 900 (вагоны модификаций серии Е)	173	7,0	105
Новосибирский	184	10	110 000	2 488,673	53	0	180
Нижегородский	160	5	100 000	2 489,993	42	7,6	360
Екатеринбургский	110	-	80 000	1 720	61	6,0	240
Самарский	92	-	92 000	1 742,126	25	3,7	420
Примечание – Из анализа исключен Казанский метрополитен, ввиду недавнего начала работы и малого парка вагонов.							

Анализ информации, представленной в таблице 2.6, показывает, что одинаковые конструкции рам тележек имеют разные показатели надежности на разных метрополитенах. Наименее надежны рамы тележек Московского и Санкт-Петербургского метрополитенов (соответственно 1736 и 374 случаев отказов рам тележек в 2010 году). С другой стороны, например, на метрополитенах Екатеринбурга и Самары отказов нет. Для выяснения причин такой ситуации выполним анализ условий эксплуатации различных метрополитенов.

1 Напряженное состояние рамы тележки в значительной степени обусловлено вертикальной статической и динамической нагрузками, связанными с величиной средней населенности вагона. Данные, представленные в таблице 2.6, показывают, что населенность вагона в час пик на Московском метрополитене в 3,6 раза выше того же показателя на Екатеринбургском метрополитене и почти в 9 раз выше показателя Самарского метрополитена.

2 Интенсивность эксплуатации рам тележек подтверждается такими показателями, как среднегодовой пробег и минимальный интервал между поездами. И здесь наиболее тяжелые условия в Москве и Санкт-Петербурге. Это означает, что столичные метрополитены работают при несколько больших ускорениях поездов при разгоне и торможении и более высоких средних скоростях движения, что отражается на режимах нагружения рамы тележки от работы тягового привода.

3 Динамические нагрузки зависят от состояния рельсового пути. Для Московского и Санкт-Петербургского метрополитенов, имеющих соответственно 12 и 5 линий, в таблице 2.6 приведены средние значения оценки состояния пути. Так, на Московском метрополитене общая балльная оценка состояния пути по состоянию на 2011-07-01 имеет следующие значения: лучшая оценка на Люблинско-Дмитровской линии – 3,81 балл/км; худшая на Замоскворецкой и Каховской линиях – 21,05 балл/км. Таким образом, и по этим показателям столичные метрополитены находятся в наиболее сложных условиях эксплуатации.

Графики, приведенные на рисунке 2.24, наглядно поясняют вышесказанное.

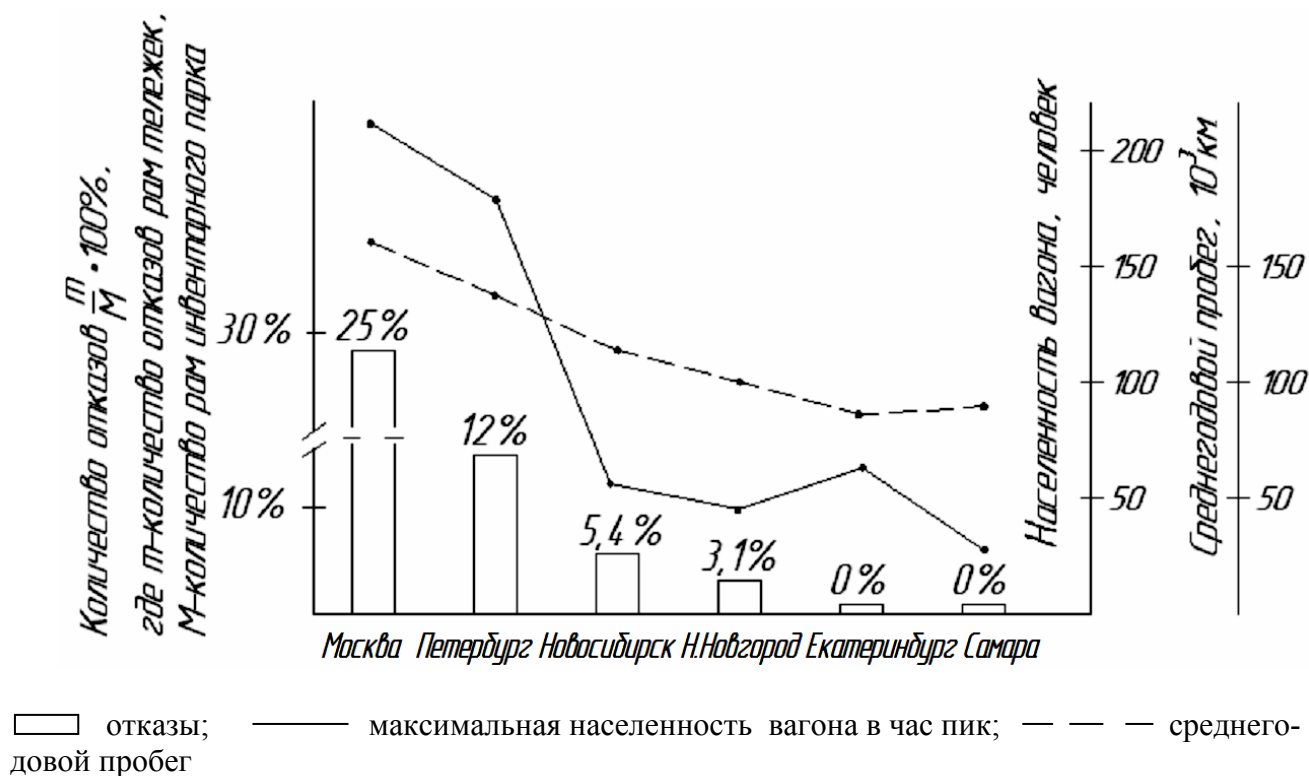


Рисунок 2.24 – Зависимость количества отказов рам тележек от загроуженности (населенности) вагона и его среднегодового пробега

2.5 Основные закономерности эволюции рам тележек и анализ современного состояния

Итак, фактом является недостаточная надежность эксплуатируемых рам тележек вагонов старых серий Московского и Санкт-Петербургского метрополитенов. В тоже время надежность таких же рам тележек на «малых» метрополитенах вполне приемлема. Поэтому столичные метрополитены, имеющие более тяжелые условия эксплуатации, требуют серьезного внимания по обеспечению условий безопасности. В настоящий момент (по состоянию на 2012 год) на Московском метрополитене действуют следующие требования:

- плановое списание из эксплуатации вагонов, выработавших ресурс;
- введение для рам тележек вагонов серий Е, 81-717/714, 81-717.5/714.5 и их модификаций назначенного ресурса, по достижению которого рамы списываются из эксплуатации;
- плановое и внеплановое списание из эксплуатации сварноштампованных рам тележек вагонов серий 81-717/714, 81-717.5/714.5 всех модификаций с заменой их на листовые шпинтонные рамы. Это означает постепенный переход вагонов этих серий на шпинтонные тележки с листовыми рамами.

Теперь можно сформулировать основные результаты исследования, выполненные в главе 2 настоящей работы.

1 Эволюция рам тележек вагонов старых серий (Е, 81-717/714, 81-717.5/714.5 и модификаций) началась с 1960-х годов. Развитие осуществлялось фактически по пути использования одной конструктивной схемы. При этом происходило постоянное увеличение эксплуатационных нагрузок на Московском и Санкт-Петербургском метрополитенах. С другой стороны, для выполнения задаваемых все более сложных условий эксплуатации, конструкторы были вынуждены увеличивать и расчетные нагрузки, прежде всего, нагрузки от оси на рельсы, а также мощность тяговых двигателей. Таким образом, к выбранной конструктивной схеме прикладывались все большие нагрузки. Для обеспечения требуемых

прочностных характеристик производились постоянные работы по модернизации рам тележек с созданием их многочисленных конструктивных исполнений.

2 Выполненные исследования показали, что Московский и Петербургский метрополитены резко выделяются из семейства российских метрополитенов по условиям эксплуатации.

3 Семейство конструкций сварноштампованных рам тележек достигло предельного состояния. Дальнейшие работы по их модернизации для тяжело нагруженных метрополитенов, прежде всего Москвы, можно считать бесперспективными. Эксплуатация этих рам тележек должна продолжаться до достижения ими назначенного ресурса с заменой на листовые конструкции.

4 Проведенные исследования показали, что семейство конструкций сварноштампованных рам тележек вагонов старых серий удовлетворяет условиям эксплуатации малозагруженных метрополитенов России.

5 Построены статистические модели и определены показатели надежности для трех групп рам тележек вагонов старых серий Московского метрополитена.

Для рам тележек вагонов модификаций серии Е среднее значение наработки до отказа составляет $1636,8 \cdot 10^3$ км, функция плотности вероятности распределения наработки до отказа имеет вид

$$\varphi(x) = 2,95 \cdot 0,545 \cdot 10^{-6} x^{1,95} \exp(-0,545 \cdot 10^{-6} x)^{1,95}.$$

Для рам тележек вагонов серий 81-717/714 среднее значение наработки до отказа составляет $1102,5 \cdot 10^3$ км, функция плотности вероятности распределения наработки до отказа имеет вид

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,209x} \exp\left[-\frac{(\lg x - 2,998)^2}{2 \cdot 0,209^2}\right].$$

Для рам тележек вагонов серий 81-717.5/714.5 и модификаций среднее значение наработки до отказа составляет $740,9 \cdot 10^3$ км, функция плотности вероятности распределения наработки до отказа имеет вид

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,156x} \exp\left[-\frac{(\lg x - 2,843)^2}{2 \cdot 0,156^2}\right].$$

6 Выявленные ненадежные узлы сварноштампованных рам тележек вагонов старых серий позволяют наметить направления дальнейших опытно-конструкторских и производственно-технологических работ по их модернизации.

7 Анализ конструкций рам тележек и опыт их эксплуатации показывают, что рамы тележек вагонов новых моделей «Яуза» и «Русич» обладают требуемыми прочностными характеристиками и имеют достаточную надежность (при этом имеется ряд технических и технико-экономических проблем, связанных с конструкцией других узлов тележки). Также необходимо отметить, что случаи отказов рам тележек вагонов «Русич» имели место в 2011-2012 годах. Однако, согласно проведенным исследованиям данные отказы были связаны с производственным браком при изготовлении партии продольных балок рам тележек.

Предварительно, можно считать конструкцию рамы тележки вагонов новых моделей подходящей для рассмотрения в качестве конструкции-прототипа при новом проектировании.

Таким образом, можно сделать следующий основной вывод, подводящий непосредственно к главной цели исследования. Существующий подвижной состав не вполне удовлетворяет требованиям метрополитенов Москвы и Санкт-Петербурга. Задача разработки для столичных мегаполисов новой конструкции рамы тележки и тележки крайне актуальна.

ГЛАВА 3 ПОСТРОЕНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ И РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ВАГОНА МЕТРОПОЛИТЕНА СОВРЕМЕННОГО МЕГАПОЛИСА

3.1 Обоснование концепции нового проектирования

Одним из основных выводов главы 2 является положение о необходимости разработки новой конструкции тележки для вагонов метрополитена столичных мегаполисов, резко выделившихся из группы российских метрополитенов по условиям эксплуатации. В рамках принятого в главе 1 алгоритма обоснования и разработки конструкции перспективной рамы тележки (рисунок 1.3) на данном этапе исследования необходимо сформулировать основные технические требования к новому подвижному составу и обосновать концепцию проектирования.

Согласно теме настоящего исследования, между ОАО «Метровагонмаш» (г. Мытищи) и ГУП «Московский метрополитен» был заключен договор на проектирование перспективного вагона метрополитена. В разработанном и согласованном сторонами техническом задании были определены технические требования, часть которых приведена ниже.

Цель разработки заключается в создании вагонов метрополитена, обладающих повышенным уровнем безопасности и комфортности пассажиров, низкими эксплуатационными затратами. Проектируемые вагоны получили следующие рабочие обозначения моделей:

- 81-760 – головной моторный вагон с кабиной управления;
- 81-761 – промежуточный моторный вагон без кабин управления.

Общие технические требования. Вагоны предназначены для работы в тоннелях на действующих линиях метрополитена с колеей 1520 мм, электрифицированных с напряжением контактной сети по ГОСТ 6962-75, с максимальной скоростью движения 90 км/ч с возможностью кратковременного выхода на открытые участки пути (до 40 мин).

Проектируемый вагон должен представлять собой односекционный цельносварной кузов с двумя моторными тележками. Токосъем вагонов должен осуществляться от контактного рельса через токоприемники, расположенные на тележках. Вагоны должны соответствовать техническому заданию, действующим стандартам, а также противопожарным, санитарно-гигиеническим нормам, эргономическим требованиям и требованиям техники безопасности.

Максимальная вместимость вагона для прочностных расчетов определяется из условия 10 чел./м², для динамических и эксплуатационных показателей из условия 8 чел./м². Номинальная вместимость определяется из условия 6 чел./м². Поезд должен формироваться из головных и промежуточных вагонов, при этом по концам поезда должны располагаться головные вагоны. Максимальное количество вагонов в поезде – 8 вагонов.

Климатическое исполнение вагона «У» категории 1.1 ГОСТ 15150-69.

Плановые подъемочные ремонты, связанные с выкаткой тележек, через каждые 560 тыс. км пробега.

Условия эксплуатации. Эксплуатация вагонов должна производиться на линиях метрополитена, соответствующих СНиП 11-40 «Метрополитены». Поезд должен быть способен вытолкнуть стоящий аварийный поезд аналогичной составности с полной нагрузкой на уклоне 40 ‰. Должна быть обеспечена возможность эксплуатации вагонов на закрытых участках пути на уклоне 60 ‰ при длине уклона не более 500 м. Вагон должен вписываться в кривые участки пути с минимальным радиусом на парковых путях 60 м, скорость движения на парковых путях не более 15 км/ч.

Требования к надежности. Назначенный срок службы до списания вагона не менее 35 лет. Требование к экипажной части вагона выражено в виде гамма-процентной наработки до отказа: 600 тыс. км пробега, в процессе которого отказ не возникнет с вероятностью 0,95.

Основные заданные технические характеристики вагонов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные технические характеристики проектируемых вагонов

Параметр	Модель вагона	
	81-760	81-761
Габарит по ГОСТ 23961-80	М	М
Номинальная вместимость вагона из расчета 6 чел./м ² , чел.	199	215
Максимальная вместимость не менее, чел.	из расчета 8 чел./м ²	252
	из расчета 10 чел./м ²	306
Число мест для сидения	38+1 место для инвалидной коляски	42+1 место для инвалидной коляски
Длина вагона по торцам автосцепок, не более, м	21	20
Масса тары вагона, не более, т	36	35
Максимальная статическая нагрузка брутто от колесной пары на рельсы, не более, кН (тс)	147 (15)	147 (15)
Конструкционная скорость, км/ч	90	90
Максимальное ускорение вагона, м/с ²	1,3	1,3
Максимальное замедление вагона, м/с ²	1,3	1,3
Коэффициент плавности хода в груженом и порожнем состоянии, не более	3,25	3,25
Длина тормозного пути со скорости 90 км/ч до полной остановки (при торможении на прямом горизонтальном участке при нагрузке 8 чел./м ² и расчетном коэффициенте сцепления 0,17), м	при служебном торможении	330
	при экстренном торможении	250
Максимальный ток, потребляемый вагоном на тягу, не более, А	1000	1000

Требования к конструкции тележек:

- тележки вагонов должны быть двухосными;
- колесные пары должны быть сформированы из цельнокатаных колес, номинальный диаметр колеса по кругу катания 860 мм;
- тележки должны иметь опорно-рамное подвешивание тягового электродвигателя и опорно-осевое подвешивание редуктора (привод 2-го класса);
- корпус тягового редуктора должен быть литым из стали или высокопрочного чугуна, неразъемным по оси колесной пары, с лабиринтными уплотнениями;
- тележки должны быть оборудованы фрикционным тормозом;
- рама тележки должна быть сварной конструкции и состоять из продольных и поперечных балок, изготавливаемых из стального проката;

- рессорное подвешивание должно быть двухступенчатым, центральное подвешивание должно быть пневматическим.

Итак, приведены основные технические требования к новому подвижному составу. Можно перейти к выработке концепции нового проектирования. Понятно, что концепция проектирования рамы тележки – основного несущего узла тележки, должна начинаться с выработки концепции построения самой тележки.

Используя результаты исследования, приведенные в главе 2, можно сделать вывод о наличии двух путей нового проектирования.

Первый путь заключается в выборе в качестве конструкции-прототипа шпинтонной тележки с листовой рамой, применяющейся сейчас на вагонах серий 81-717.5, 81-714.5 и их модификациях (рисунок 2.1). Это конструкция в целом отработана и достаточно надежна. Разработанная для этой тележки в 2008 году листовая рама тележки соответствует прочностным требованиям и прошла весь объем испытаний. Важные аргументы в защиту этого направления – наличие опыта эксплуатации, производственно-технологической и ремонтной базы.

Однако такое направление проектирования имеет и слабые стороны. Во-первых, это опять повторение старой конструктивной схемы, устаревшей технически и морально. Подобная схема развития узла, проводимая с начала 1960-х годов, подвергалась критическому изучению в главе 2 настоящего исследования.

Во-вторых, проанализировав данные технического задания и существующие характеристики тележек вагонов серий 81-717.5 (таблица 2.3), можно сделать следующие выводы. Чтобы выполнить требования технического задания необходимо опять провести работы по модернизации тележек старых серий с целью их дополнительного нагружения. Например, требуется повысить нагрузки от колесной пары на рельсы с 133,3 кН до 147 кН, по результатам тяговых расчетов требуется существенно повысить мощность тяговых электродвигателей со 115 кВт до 170 кВт, несколько увеличить ускорения при разгоне и торможении. Немаловажным обстоятельством является требование иметь конструктивное исполнение с центральным пневматическим подвешиванием, а рассматриваемый прототип имеет пружинное центральное подвешивание. Конструктивный анализ тележки-

прототипа, в принципе, позволяет начать подобную работу. Однако проанализируем еще раз прочностные характеристики рам тележек вагонов серии 81-717.5. Для этого обратимся к распределению эквивалентных напряжений в элементах сварноштампованной и листовой шпинтонных рам (рисунки 2.11 и 2.14). У листовой рамы, по прежнему максимальные напряжения действуют в зоне средней шпинтонной втулки со стороны блок-тормоза и составляют 159 МПа. И хотя действующие напряжения не превышают допускаемых $[\sigma] = 180$ МПа, сравнительный анализ показывает, что данная конструкция достигла своего предельного (на предмет дальнейшего развития) состояния. Поэтому, принимается решение о бесперспективности такого проектирования.

С другой стороны, мы имеем принципиально новые конструкции тележек вагонов типа «Яуза» и «Русич» (рисунок 2.2), в которых реализованы практически все современные тенденции развития моторвагонного подвижного состава, в том числе и полностью подрессоренный привод колесных пар.

В настоящий момент имеется достаточный опыт производства и эксплуатации (с 1998 года) тележек этой конструкции. Усталостных повреждений рам тележек выявлено не было. Однако, имеется ряд недостаточно надежных узлов тележек, обусловленных наличием 3-го класса тягового привода. Применение такого привода связано с тем, что вагоны «Яуза» разрабатывались для планируемых в советское время скоростных радиальных линий Московского метрополитена со скоростями движения 120 км/ч. Строительство таких линий больше не планируется. По результатам производства и эксплуатации тележек вагонов «Яуза» и «Русич» можно констатировать технико-экономическую неоправданность такого привода. Аргументы приведены ниже.

Во-первых, применение 3-го класса привода при невысоких скоростях движения (не более 80 км/ч) и невысоких нагрузках от оси на рельсы (не более 147 кН) нецелесообразно. Также необходимо отметить, что колесные пары вагонов 81-717 (2 класс привода) и 81-740 (3 класс привода) имеют примерно одинаковые неподрессоренные массы, определяющие динамическую нагрузку на путь. Одна из причин увеличения диаметра колес по кругу катания (с 780 до 860 мм) у

вагонов новых моделей была связана с необходимостью размещения передаточного механизма, отсутствующего у привода 2-го класса. Таким образом, уменьшение неподрессоренной массы у 3-го класса привода за счет поддрессирования редуктора было компенсировано увеличением массы ходовых колес и новой массой части передаточного механизма.

Во-вторых, повышения надежности от уменьшения динамических нагрузок на привод за счет поддрессирования редуктора не произошло. Привод 3-го класса требует высокого качества и точности изготовления колесных пар, узлов подвешивания привода, рам тележек. Снижение уровня производства и квалификации рабочих кадров в отечественном машиностроении не позволяет обеспечить требуемое и стабильное качество. В результате недостаточно надежны: редукторный узел, узел подвешивания тягового привода (прежде всего из-за перекосов привода), резинометаллические шарниры передаточного механизма (из-за низкого качества изготовления).

В-третьих, сложная конструкция 3-го класса привода не только увеличивает количество весьма сложных узлов, понижая тем самым по теории вероятностей показатели надежности, но и приводит к большим финансовым затратам на производство, эксплуатацию, ремонт. Например, цены производства и полного освидетельствования колесной пары вагона «Русич» выше цен для колесных пар вагонов серии 81-717 примерно в 2,2 и 3 раза соответственно.

В то же время, конструкция тележек вагонов этих моделей удачна, а технические характеристики этих тележек подходят для вагонов перспективного проектирования.

Исходя из вышесказанного, предлагается следующее решение. Взяв за основу проектирования тележки вагонов метро моделей «Яуза» и «Русич», разработать новую конструкцию, принципиальным отличием которой будет отказ от привода 3-го класса и переход к приводу колесных пар 2-го класса, в котором опорно-рамное подвешивание тягового двигателя сочетается с опорно-осевой конструкцией подвешивания редуктора. С точки зрения методологии проектирования это означает создание конструкции, у которой на основании имеющегося

опыта производства и эксплуатации будут взяты сильные стороны одних конструкций и исключены слабые стороны других. В нашем случае новая тележка должна иметь положительно зарекомендовавшие себя в эксплуатации узлы тележек вагонов метро «Яуза» и «Русич». Это, прежде всего, новая рама тележки, пневматическое центральное подвешивание, шарнирно-рычажная связь колесной пары с рамой тележки, а также отработанные узлы вагонов старых серий – колесные пары и подвешивание тягового привода.

3.2 Разработка новой конструкции тележки и рамы тележки

На основании принятой в параграфе 3.1 концепции разработана конструкция тележки для перспективного вагона метрополитена, общий вид которой приведен на рисунке 3.1. Чертеж общего вида тележки приведен на рисунке 3.2.

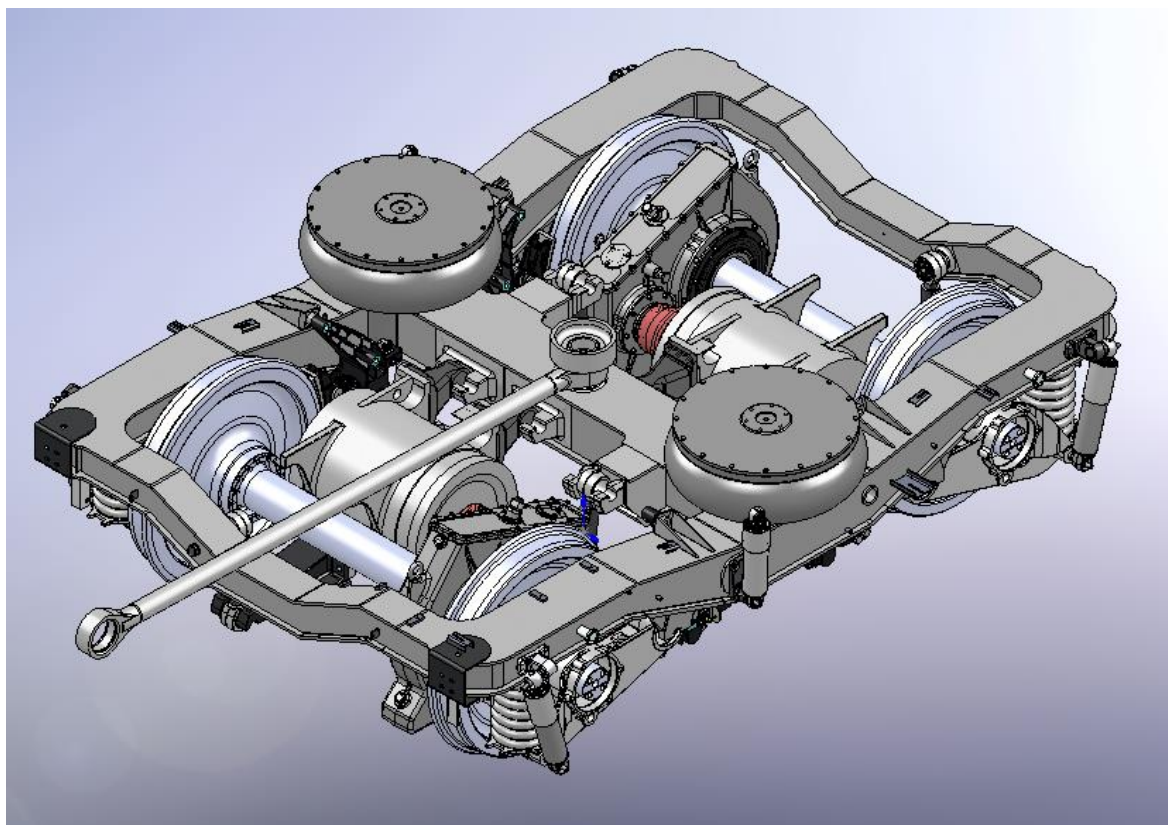
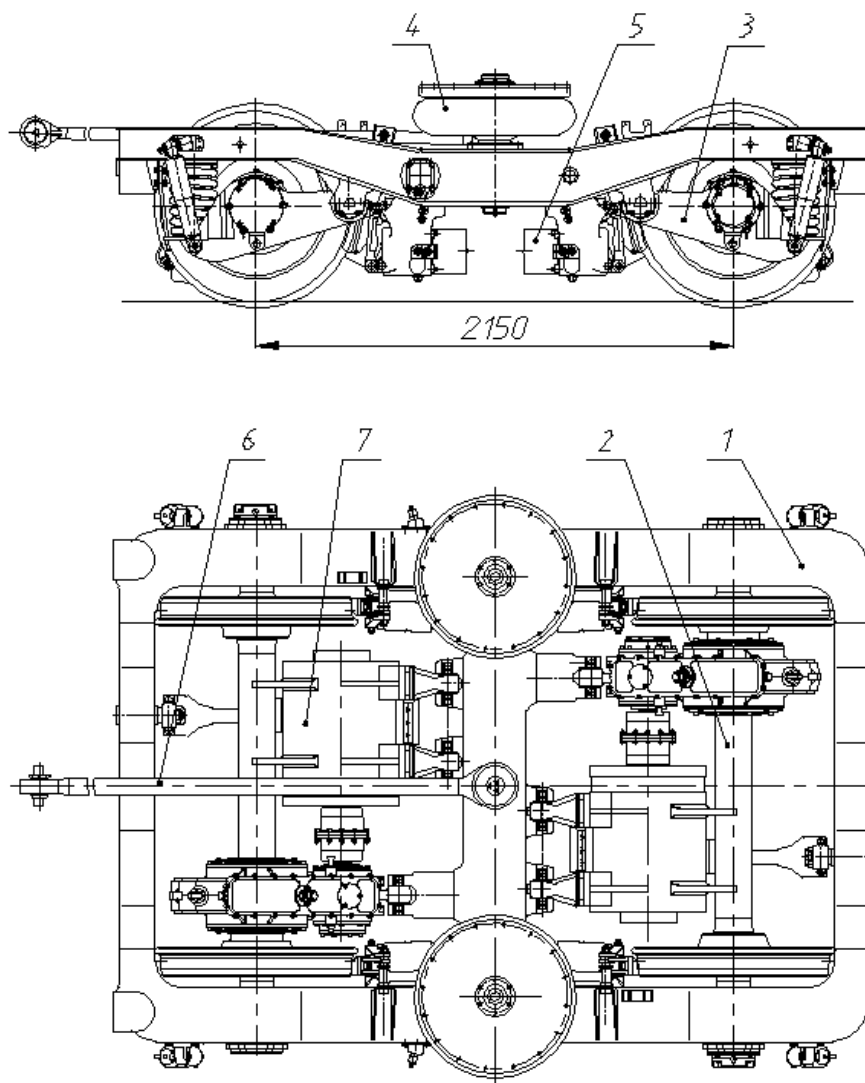


Рисунок 3.1 – Общий вид тележки перспективных вагонов метрополитена моделей 81-760, 81-761



1 - рама тележки; 2 - пара колесная с редуктором; 3 - букса и буксовое подвешивание; 4 - центральное подвешивание; 5 - механический тормоз; 6 - связь кузова с тележкой; 7 - тяговый электродвигатель

Рисунок 3.2 – Чертеж общего вида тележек вагонов моделей 81-760, 81-761

Тележка двухосная, с индивидуальным тяговым приводом и двухступенчатым рессорным подвешиванием. Центральное подвешивание – пневматическое. Вертикальная нагрузка передается от кузова на тележки и рельсы следующим образом: пневморессоры – рама тележки – пружины буксового подвешивания – буксы – колесные пары – рельсы. Связь кузова с тележкой выполнена через наклонную тягу. Поперечные перемещения кузова ограничены центральным упором, расположенным на шкворне соединения наклонной тяги с рамой тележки, и боковыми упорами, расположенными на раме вагона. Подвешивание тяговых электродвигателей опорно-рамное: двигатель закреплен на раме тележки с

использованием резинометаллических амортизаторов на трех точках рамы. Две точки крепления двигателя находятся на центральной балке рамы тележки, третья точка расположена на концевой балке с соединением двигателя через тягу, что позволяет уменьшить нагрузку от крутящих моментов на центральную балку рамы тележки. Редуктор имеет опорно-осевое подвешивание. Соединение вала тягового двигателя с редуктором осуществляется с помощью зубчатой муфты. Вращающий момент передается от тягового электродвигателя на вал-шестерню редуктора, большое зубчатое колесо, напрессованное вместе с корпусом редуктора через ступицу на ось колесной пары. Связь колесной пары с рамой тележки выполнена через шарнирно-рычажный механизм. Тяговые усилия передаются от колесной пары на раму вагона так: колесная пара – букса (с шарнирно-рычажным механизмом) – рама тележки – наклонная тяга – рама вагона. Механический тормоз тележки дотормаживающий (основной тормоз – электрический) представляет пневматический колодочный тормоз с односторонним прижатием колодки к колесу. Состоит из четырех компактных блок-тормозов.

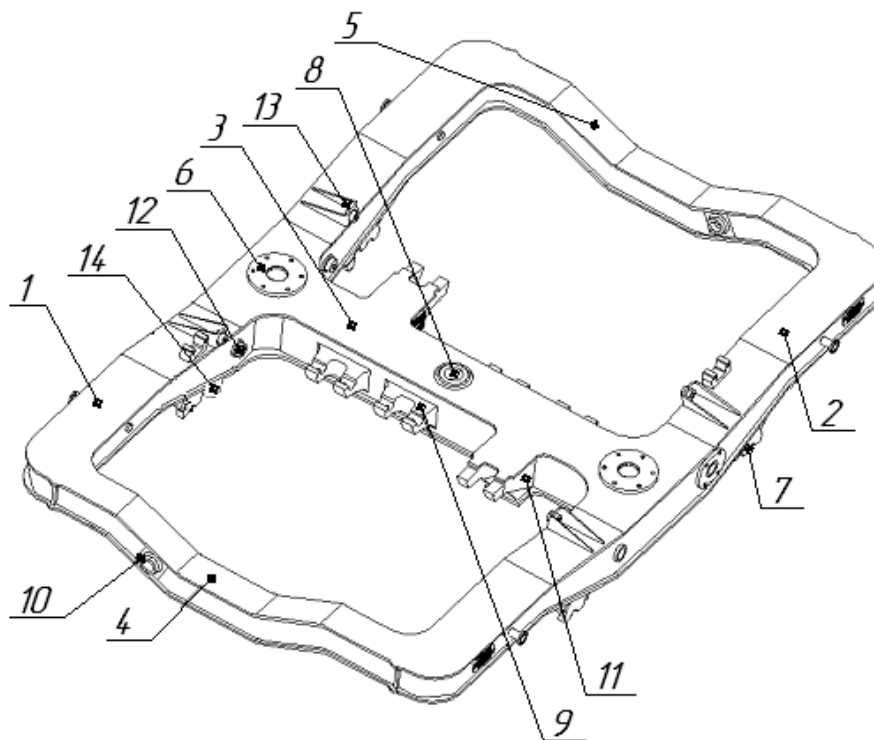
Основные технические характеристики спроектированной тележки приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики тележек вагонов моделей 81-760, 81-761

Характеристика	Значение
Конструкционная скорость, км/ч	90
Максимальная нагрузка от оси на рельсы, кН (тс)	147 (15)
Масса тележки, кг	7700
База тележки, мм	2150
Диаметр нового колеса по кругу катания, мм	860
Тип колес	цельнокатанные
Связь колесной пары с рамой тележки	шарнирно-рычажный механизм
Связь кузова с тележкой	через наклонную тягу
Класс подвешивания тягового привода	2
Рессорное подвешивание	двухступенчатое: буксовое пружинное, центральное пневматическое
Тип тягового электродвигателя	переменного тока (асинхронный)
Мощность тягового электродвигателя, кВт	170
Тип пневморессор	диафрагменные
Передаточное отношение редуктора	5,75
Эквивалентный суммарный статический прогиб рессорного подвешивания, мм	226

Исходя из компоновки и конструктивных особенностей тележки, разработана конструкция рамы тележки (рисунок 3.3). Рама тележки сварной конструкции замкнутой конфигурации с двумя продольными балками, одной центральной и двумя концевыми. Все балки листовой конструкции. Материал рамы – сталь 09Г2Д ГОСТ 19281. Масса рамы тележки 1250 кг. После сварки, перед механической обработкой, рама тележки подвергается низкотемпературному отжигу.

На продольных балках имеются буксовые кронштейны, тормозные кронштейны, опоры пневморессор, кронштейны крепления гидравлических гасителей колебаний. На центральной балке имеются кронштейны крепления тяговых двигателей, кронштейны редуктора, втулка шкворня связи кузова с тележкой. Третья нижняя точка крепления двигателя расположена на концевой балке.



1, 2 - продольные балки; 3 - центральная балка; 4, 5 - концевые балки; 6 - опорная плита пневморессоры; 7 - буксовый кронштейн (крепление рычага буксы); 8 - втулка шкворня связи кузова с тележкой; 9 - кронштейн тягового двигателя; 10 - кронштейн шкворня подвески тягового двигателя; 11 - кронштейн подвешивания редуктора; 12 - средний тормозной кронштейн крепления блок-тормоза; 13 - верхний тормозной кронштейн; 14 - нижняя точка крепления блок-тормоза (на буксовом кронштейне)

Рисунок 3.3 – Общий вид рамы тележки вагонов метрополитена моделей 81-760, 81-761

Сечение каждой балки новой рамы тележки схематично показано на рисунке 3.4. С целью уменьшения концентрации напряжений сварных швов им прида-

ется вогнутая форма с выполнением плавной радиусной части шва, что обеспечивается механической обработкой шва с шероховатостью $Ra\ 12,5$ или оплавкой вольфрамовым электродом в среде аргона (рисунок 3.4, б). Конструкция основных узлов рамы тележки приведена в таблице Б1 Приложения Б. Конструкция мест соединения продольной и центральной балок рамы показана на рисунке 3.5.

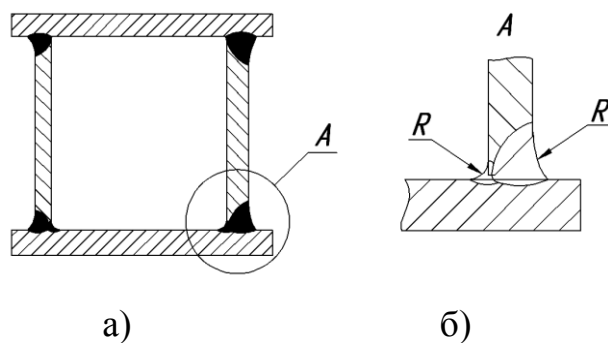
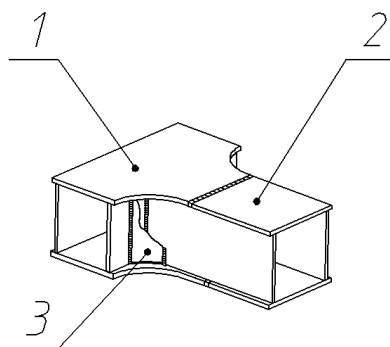


Рисунок 3.4 – Конструкция балок рамы тележки:
а) поперечное сечение балки; б) конфигурация сварных швов



1 - продольная балка; 2 - центральная балка; 3 - усиливающая накладка (показана с вырезом)

Рисунок 3.5 – Узел соединения двух балок

3.3 Основные положения и математическая сущность метода конечных элементов

Новая конструкция рамы тележки подлежит теоретическому исследованию с целью изучения ее прочностных характеристик. При исследовании будет производиться моделирование рамы с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Ниже приведены основные положения МКЭ в прочностных расчетах. Для описания метода использованы работы Г. Стренга, Д. Фикса [107], А.Б. Каплуна, Е.М. Морозова, М.А. Олферьевой [43].

Последовательность исследования прочности конструкций с использованием МКЭ следующая: построение физической модели, построение математической модели, исследование математической модели, анализ результатов.

Физическая модель является типичной моделью, наделяемой лишь частью свойств реальной конструкции. В МКЭ принимается следующий набор основных идеализаций свойств конструкции и внешних воздействий:

- реальное твердое тело заменяется воображаемой (модельной) сплошной средой, то есть принимается положение, что любой объем выделенный из среды содержит вещество;

- телу присваиваются свойства однородности, то есть принимается положение, что свойства выделенных из тела любых малых объемов одинаковы;

- предполагается, что сила есть результат взаимодействия двух твердых тел, то есть сила считается сосредоточенной, приложенной в точке;

- твердое тело идеализируется как абсолютно жесткое.

Математическое моделирование представляет математическое описание поведения модели. Суть МКЭ заключается в том, что непрерывная величина, например напряжение, аппроксимируется моделью, структурно представляющей собой совокупность отдельных участков (элементов). При этом исследуемая непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе кусочно-непрерывной функцией, задаваемой на значениях исследуемой непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемого элемента. Аппроксимирующие функции выбираются в виде линейных, квадратичных или кубических полиномов. Для каждого элемента подбирается свой полином с сохранением непрерывности величины вдоль границ элемента. Основные соотношения МКЭ записываются в матричном виде с привлечением операций матричной алгебры.

Опишем теперь сказанное математически с вариационной постановкой задачи (вариационный метод считается в МКЭ классическим) для одномерного пространства. В качестве примера возьмем уравнение

$$-\frac{d}{dx}\left(p(x)\frac{du}{dx}\right) + q(x)u = f(x) \quad (3.1)$$

При постановке краевых (граничных) условий в точках $x=0$ и $x=\pi$ получим классическую задачу Штурма - Лиувилля с уравнением, описывающим ряд различных физических процессов, например, амплитуду колебаний струны или распределение температуры в некотором стержне.

Пусть левый конец струны зафиксирован, а правый свободен. Тогда в точке $x=0$ краевое условие является главным (кинематическим), или условием Дирихле $u(0)=0$, а в точке $x=\pi$, где струна не закреплена, возникает естественное (динамическое) краевое условие, или условие Неймана $u'(\pi)=0$.

При исследовании подобных модельных задач математики комбинируют дифференциальное уравнение и краевые условия в одно целое:

$$Lu = f, \quad (3.2)$$

где L – линейный оператор, действующий на определенном классе функций, удовлетворяющих краевым условиям и дважды дифференцируемых.

Формулировка задачи: подобрать пространство функций u и класс правых частей f так, чтобы каждой функции f соответствовало единственное решение u . Линейное уравнение (3.2) связано с квадратичным функционалом

$$I(v) = (Lv, v) - 2(f, u) \quad (3.3)$$

Связь между этими уравнениями обусловлена следующим: уравнение (3.2) есть уравнение Эйлера, оно дает условие минимизации функционала I . Задачи обращения оператора L и минимизации функционала I эквивалентны и решением для них служит одна и та же функция u .

Методами высшей математики можно доказать, что если v удовлетворяет краевым условиям $v(0)=v'(\pi)=0$, то квадратичный функционал имеет вид

$$I(v) = \int_0^{\pi} [p(x)(v'(x))^2 + q(x)(v(x))^2 - 2f(x)v(x)] dx \quad (3.4)$$

В вариационной форме задача заключается в минимизации квадратичного функционала (3.4) на бесконечномерном пространстве \mathcal{H}_E^1 (\mathcal{H}_E^1 – пространство функций, допустимых при минимизации). Элементы этого пространства имеют первые производные с конечной энергией и удовлетворяют главному краевому

условию $v(0) = 0$. Исследуем математическую модель (в данном случае уравнение (3.4)) при заданных краевых условиях методом Ритца. Суть метода Ритца заключается в замене \mathfrak{C}_E^1 последовательностью конечномерных подпространств S^h , содержащихся в \mathfrak{C}_E^1 . Элементы v^h из S^h называются пробными функциями, которые удовлетворяют главному краевому условию $v^h(0) = 0$ (так как принадлежат \mathfrak{C}_E^1). На каждом подпространстве S^h минимизация функционала I приводит к решению системы линейных уравнений, число уравнений совпадает с размерностью подпространства S^h . Таким образом, аппроксимация Ритца – это функция u^h , минимизирующая I на подпространстве S^h :

$$I(u^h) \leq I(v^h) \text{ для всех } v^h \in S^h.$$

Требуется определить функцию u^h . Начнем с построения подпространств S^h . Для взятого примера областью является интервал $[0, \pi]$, который разбивается на отрезки. На каждом из этих отрезков в качестве пробных функций берутся полиномы. Между отрезками в узлах требуется некоторая степень непрерывности. Максимальная величина непрерывности связана со следующими условиями: функции v^h должны быть допустимы для вариационного метода; определяемые величины должны удобно вычисляться из приближенного решения u^h .

Для взятого примера допустимым пространством \mathfrak{C}_E^1 будет пространство непрерывных функций. Поэтому в качестве S^h берется множество функций, линейных на каждом интервале $[(j-1)h, jh]$, непрерывных в узлах $x = jh$ и равных нулю при $x = 0$. Производная такой функции кусочно постоянна и обладает, очевидно, конечной энергией. Таким образом, S^h является подпространством пространства \mathfrak{C}_E^1 . Такие пробные функции называют линейными элементами.

Пусть функция φ_j^h принадлежит S^h и равна единице в узле $x = jh$ и нулю в других узлах, $j = 1, \dots, N$ (рисунок 3.6). Такие функции образуют базис в подпространстве S^h , так как любой элемент из S^h можно записать в виде

$$v^h(x) = \sum_1^N q_j \varphi_j^h(x), \quad (3.5)$$

Коэффициент q_j в формуле (3.5) совпадает с значением v в j -м узле $x = jh$.

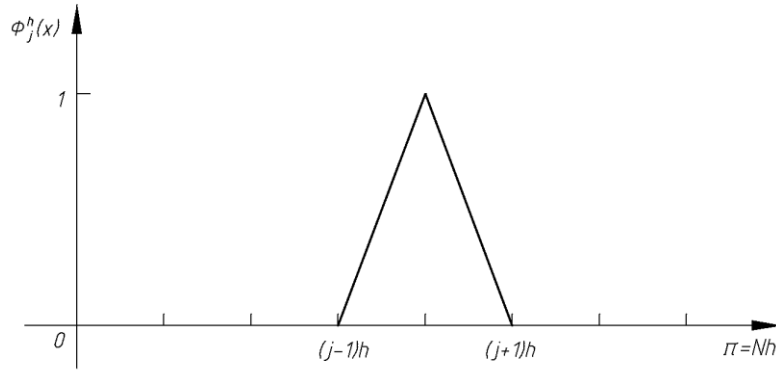


Рисунок 3.6 – Кусочно-линейные базисные функции

С нормализованными коэффициентами $p = q = 1$ задача состоит в минимизации функционала

$$I(v^h) = \int_0^\pi \left[\left((v^h)' \right)^2 + (v^h)^2 - 2fv^h \right] dx \quad (3.6)$$

При $v^h = \sum q_j \phi_j^h$ этот интеграл является квадратичной функцией координат q_1, q_2, \dots, q_N и его можно вычислить на каком-то одном подынтервале. На j -м подынтервале функция v^h линейна, $v^h((j-1)h) = q_{j-1}$, $v^h(jh) = q_j$, $(v^h)' = (q_j - q_{j-1})/h$ (считаем, что $q_0 = 0$).

Поэтому

$$\int_{(j-1)h}^{jh} \left((v^h)' \right)^2 dx = \frac{(q_j - q_{j-1})^2}{h} \quad (3.7)$$

Вычисление дает

$$\int_{(j-1)h}^{jh} (v^h)^2 dx = \frac{h}{3} (q_j^2 + q_j q_{j-1} + q_{j-1}^2) \quad (3.8)$$

В формуле (3.8) члены соответствуют отдельному куску струны с линейным изменением перемещения. Для всей струны член второго порядка в $I(v^h)$ равен

$$\int_0^\pi p \left((v^h)' \right)^2 + q (v^h)^2 = \sum_i^N \frac{p(q_j - q_{j-1})^2}{h} + \frac{qh(q_j^2 + q_j q_{j-1} + q_{j-1}^2)}{3} \quad (3.9)$$

Данная запись не слишком удобна. Желательно получить результат в матричном виде $q^T K q$.

Запишем правую часть формулы (3.7) в матричной форме

$$(q_{j-1}q_j)\frac{1}{h}\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} q_{j-1} \\ q_j \end{pmatrix} = (q_{j-1}q_j)k_i\begin{pmatrix} q_{j-1} \\ q_j \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Матрица k_i называется матрицей жесткости элемента. Так как она не зависит от дифференциального уравнения, ее достаточно вычислить один раз. Вычисление члена $\int (v^h)^2 dx$ нулевого порядка на отдельном элементе также проводится один раз с получением матрицы массы элемента:

$$\frac{h}{3}(q_{j-1}^2 + q_{j-1}q_j + q_j^2) = (q_{j-1}q_j)\frac{h}{6}\begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} q_{j-1} \\ q_j \end{pmatrix} = (q_{j-1}q_j)k_0\begin{pmatrix} q_{j-1} \\ q_j \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Матрица, связанная с $\int_0^\pi \left((v^h)' \right)^2 dx$, при условии, что неизвестное q_0 отброшено (так как оно определяется главным краевым условием), будет иметь вид

$$K_1 = \frac{1}{h}\begin{pmatrix} 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} + \frac{1}{h}\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} + \dots + \frac{1}{h}\begin{pmatrix} \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{pmatrix} = \frac{1}{h}\begin{pmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & \cdot \\ -1 & 2 & -1 & \cdot & 0 \\ 0 & -1 & \cdot & -1 & 0 \\ 0 & \cdot & -1 & 2 & -1 \\ \cdot & 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Матрица и интеграл связаны формулой

$$\int_0^\pi \left((v^h)' \right)^2 dx = (q_1 \dots q_N) K_1 \begin{pmatrix} q_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ q_N \end{pmatrix} = q^T K_1 q \quad (3.13)$$

Интеграл от $(v^h)^2$ равен $q^T K_0 q$, где матрица массы K_0 строится так же:

$$K_0 = \frac{h}{6}\begin{pmatrix} 4 & 1 & 0 & 0 & \cdot \\ 1 & 4 & 1 & \cdot & 0 \\ 0 & 1 & \cdot & 1 & 0 \\ 0 & \cdot & 1 & 4 & 1 \\ \cdot & 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

Теперь требуется вычислить член $\int f v^h$, с которым неоднородная нагрузка f входит в аппроксимацию. Этот интеграл линеен относительно координат q_j :

$$\int_0^\pi f v^h dx = \sum_1^N q_j \int_0^\pi f \varphi_j^h dx = F^T q \quad (3.15)$$

В формуле (3.15) вектор нагрузок F имеет координаты

$$F_j = \int_0^\pi f \varphi_j^h dx \quad (3.16)$$

Эти величины так же, как и матрицы жесткости и массы вычисляются интегрированием на одном элементе. Пусть на j -м интервале

$$\int_{(j-1)h}^{jh} f v^h = \alpha_j q_{j-1} + \beta_j q_j \quad (3.17)$$

При суммировании таких интегралов коэффициент при q_k равен $F_k = \beta_k + \alpha_{k+1}$. Такая форма удобна для хранения в памяти электронной вычислительной машины (ЭВМ). Заданный узел kh является правым концом в k -м подынтервале, что дает в интеграле $\beta_k q_k$, а левым концом в следующем подынтервале, что дает в интеграле $\alpha_{k+1} q_k$. Таким образом, оба подынтервала стыкуются в k -м узле.

Затем выполним прямое численное интегрирование. На каждом подынтервале $f v^h$ интегрируется по стандартной квадратурной формуле

$$\int f v^h = \sum \omega_i f(\xi_i) v^h(\xi_i) \quad (3.18)$$

Интегралы от $p(x) \left((v^h)' \right)^2$ и $q(x) (v^h)^2$ также вычисляются на каждом подынтервале с использованием численной квадратуры.

Конечные результаты хранятся в виде приближенных матриц, квадратичные формы которых близки к точным интегралам $q^T K_1 q$ и $q^T K_0 q$. Обозначим глобальную матрицу жесткости K , которая равна $K = K_1 + K_0$. После проведения описанных вычислений получаем

$$I(v^h) = I\left(\sum q_j \varphi_j^h\right) = q^T K q - 2F^T q \quad (3.19)$$

Формула (3.19) представляет собой дискретное выражение, представленное в стандартной вариационной форме.

Минимизирующий вектор Q определяется линейным уравнением

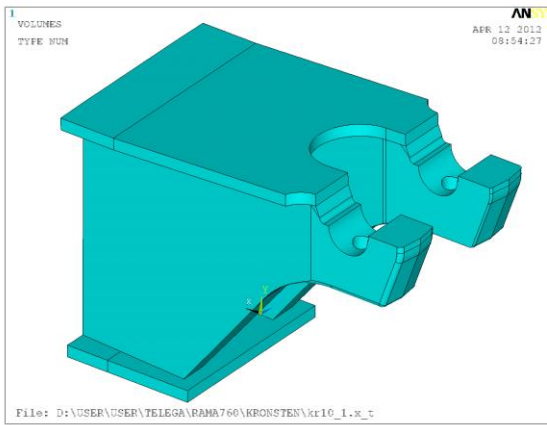
$$KQ = F \quad (3.20)$$

Уравнение (3.20), иногда называемое уравнением метода конечных элементов, наиболее удобно решается с использованием стандартных матричных процедур, применяемых на вычислительных машинах.

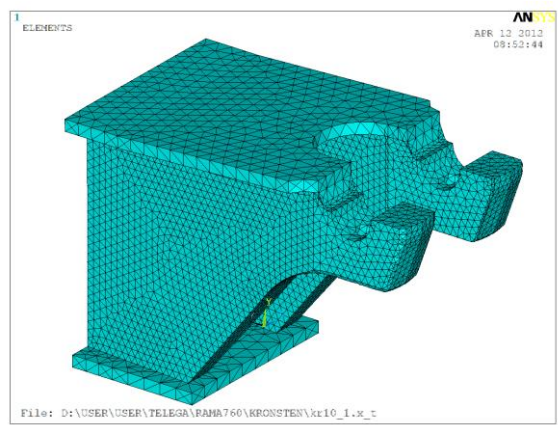
С точки зрения практической реализации в проектно-конструкторской сфере суть МКЭ кратко можно сформулировать так. Конструкция, например рама тележки, заменяется множеством конструктивных элементов, соединенных в конечном числе узловых точек. При известных соотношениях между силами и перемещениями для каждого элемента, используя законы строительной механики, изучается поведение всей конструкции. Основные этапы конечно-элементного моделирования в наглядной форме приведены на рисунке 3.7 на примере кронштейна рамы тележки.

Таким образом, решение задачи с использованием МКЭ производится в следующей последовательности:

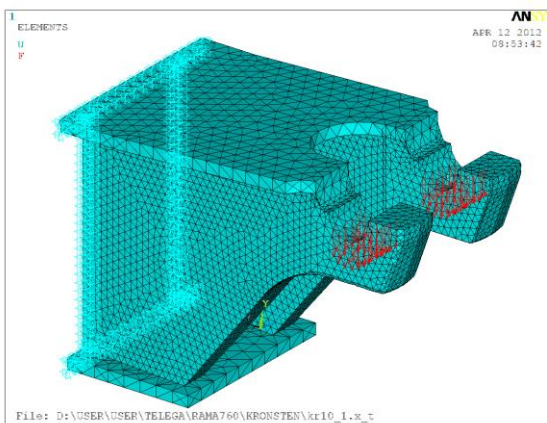
- разработка конструкции (чертежей);
- определение нагрузок;
- разработка модели, имеющей геометрические характеристики, пригодные для конечно-элементного моделирования;
- разбивка модели на сетку конечных элементов, то есть разделение всей модели на конечные элементы, связанные между собой в узлах;
- приложение к модели граничных условий – перемещений или сил, записываемых для узлов (закрепление на границе или граничные нагрузки);
- численное программное решение системы уравнений;
- получение результатов расчета и их анализ.



1



2



3

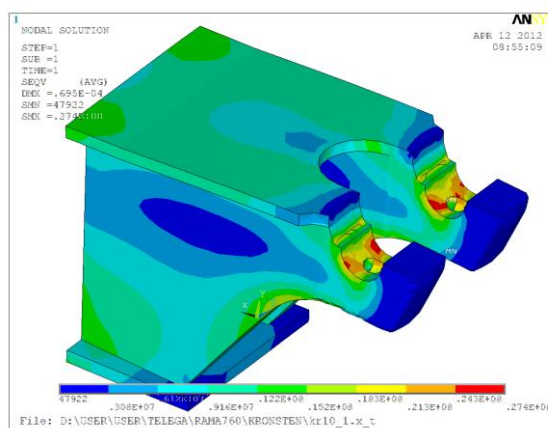
$$\begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} [K] \begin{Bmatrix} \Delta \\ \Delta \\ \Delta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ F \\ F \end{Bmatrix}$$

$$\{\Delta\} = [K]^{-1} \{F\}$$

$$\varepsilon = \frac{dv}{dx}$$

$$\sigma = E\varepsilon$$

4



5

Рисунок 3.7 – Этапы конечно-элементного моделирования:

- 1 - разработка чертежа и определение нагрузок; 2 - разбивка конечно-элементной сетки; 3 - задание граничных условий; 4 - программный расчет; 5 - результаты расчета

3.4 Конечно-элементная модель новой рамы тележки

Целью моделирования и расчёта является оценка прочности конструкции спроектированной рамы тележки вагона метрополитена моделей 81-760, 81-761. Моделирование производилось на основе разработанных ОАО «Метровагонмаш» комплекта чертежей 7600.31.20.010СБ Рама тележки. Расчёт выполнен в соответствии с Нормами для проектирования, расчёта и оценки прочности и динамики механической части вагонов метрополитена колеи 1520 мм [62] (далее «Нормы») на наиболее невыгодное возможное сочетание одновременно действующих нормативных сил по режимам Па и Пб. Режим Па – эксплуатационный режим, учитывающий силы, действующие при разгоне поезда до конструкционной скорости и при прохождении расчётной кривой. Режим Пб – это расчётный режим трогания с места или дотормаживания с малой скорости до остановки.

Расчёт рамы тележки выполнен с использованием МКЭ с помощью программного комплекса ANSYS 10.0. Обоснование выбора метода расчета приведено в параграфе 1.3, основные положения МКЭ даны в параграфе 3.3. Таким образом, будет выполнена теоретическая часть работы, заключающаяся в физическом и математическом моделировании и изучении математической модели.

Материал рамы тележки – сталь 09Г2Д. Механические характеристики согласно [62] приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Механические характеристики стали 09Г2Д

Материал	Модуль упругости $E \times 10^{-5}$, МПа	Коэффициент Пуассона μ	Предел текучести σ_T , МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Предел выносливости гладкого образца σ_{-1} , МПа	Допустимое напряжение растяжения-сжатия и изгиба [σ], МПа
09Г2Д	2,1	0,3	295	430	210	180

Основные исходные данные для конечно-элементного моделирования сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Исходные данные для моделирования рамы тележки

Наименование	Обозначение	Величина
База вагона, м	L	12,6
База тележки, м	p	2,15
Расстояние между кругами катания колесных пар, м	$2b$	1,58
Расстояние между осями пневморессор, м	c	1,88
Конструкционная скорость, км/ч	v	90
Масса вагона (брутто), т	M_B	60
Масса тележки, т	M_T	7,7
Подрессоренная масса тележки, т	$M_{ТП}$	4,4
Подрессоренная масса кузова, т	M_K	44,6
Приведённая вертикальная жёсткость одного комплекта центрального подвешивания (брутто), кН/м	$C_{ВЦ}$	602
Горизонтальная жёсткость одного комплекта центрального подвешивания (брутто), кН/м	$C_{ГЦ}$	146
Вертикальная жёсткость одного комплекта буксовых пружин, кН/м	$C_{ВТ}$	436
Горизонтальная жёсткость одного комплекта буксовых пружин, кН/м	$C_{ГТ}$	764
Эквивалентный суммарный статический прогиб, м	$f_{СТ}$	0,226
Масса электродвигателя, кг	$m_{ДВ}$	800
Масса редуктора (с муфтой), кг	$m_{РЕД}$	500
Масса рамы тележки, кг	$m_{РТ}$	1250
Высота центра тяжести брутто кузова от уровня опоры кузова на верхнюю плоскость пневморессоры, м	h_K	0,958

На начальном этапе построена физическая модель рамы тележки, приведенная на рисунке 3.8, на которой реализована идеализация материала конструкции и приложены внешние нагрузки. **Закрепление модели** введено следующим образом. Связь рамы с колесными парами выполнена через четыре модели букс, предназначенные для задания граничных условий, наиболее соответствующих физическому поведению модели. Каждая букса связана с рамой тележки: с одной стороны буксы через комплект пружин, с другой стороны через резинометаллический шарнир. Для всех букс разрешен поворот вокруг оси колесной пары, а для двух букс одной из осей разрешено перемещение вдоль продольного оси пути.

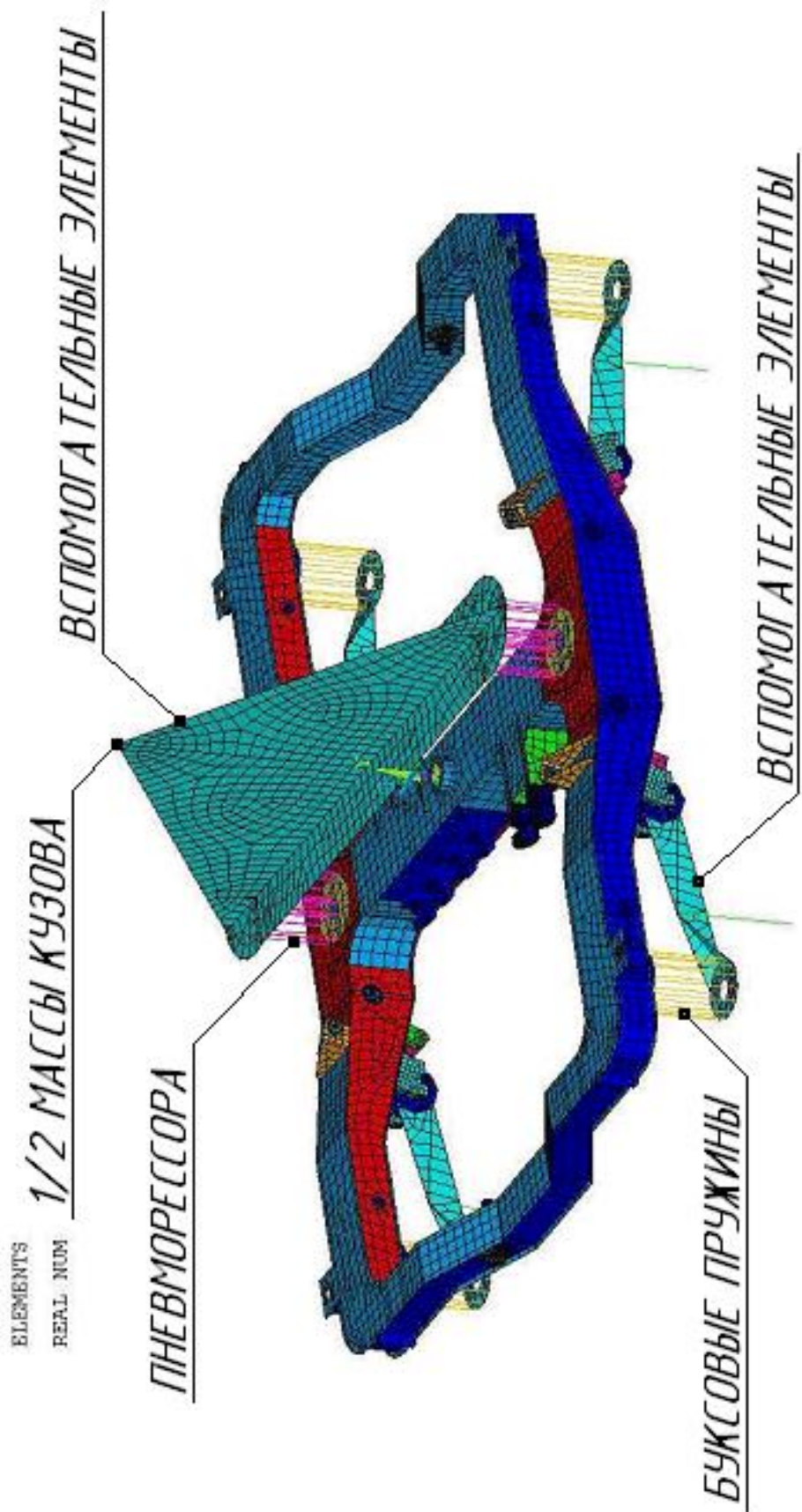


Рисунок 3.8 – Общий вид конечно-элементной модели рамы тележки

Закрепление и нагружение конечно-элементной модели реализовано следующим образом:

- связь рамы тележки с осями колёсных пар осуществляется через вспомогательные элементы, моделирующие буксу;
- рама установлена на комплектах пружин, имеющих характеристики буксовых;
- буксовый резинометаллический шарнир моделируется объёмными элементами;
- связь кузова с тележкой осуществляется через контактные элементы, моделирующие взаимодействие шкворня и втулки центральной балки;
- элемент массы $\frac{1}{2}$ кузова, расположенный на расчётной высоте относительно рамы тележки, опирается через вспомогательные элементы на пневморессоры центрального подвешивания, которые моделируются упругими элементами соответствующей жёсткости.

Конечно-элементная модель состоит из следующих типов конечных элементов:

SOLID45 – восьмиузловой объёмный элемент (втулка центрального подвешивания, кронштейны подвески электродвигателя и редуктора, втулки тормозных кронштейнов, опоры тягового двигателя на концевых балках и буксовые кронштейны);

SHELL63 – четырёхузловой оболочечный элемент (продольные и поперечные балки, ребра жёсткости, накладки, вспомогательные элементы);

PIPE16 – элемент трубы (шкворень);

MATRIX27 – упругий элемент (буксовые пружины, пневморессоры);

MASS21 – массовые элементы (масса кузова).

На первом этапе было принято допущение об однородности всех сварных швов и основного материала рамы. По результатам первого этапа расчета проводилось дополнительное исследование некоторых зон модели путем их объемного моделирования (места соединения балок, ряд кронштейнов).

Пояснения по построению конечно-элементной модели и ожидаемым результатам моделирования. Первым этапом построения модели была работа, описанная в параграфе 3.2, то есть разработка полного комплекта конструкторской документации (КД). С точки зрения методологии науки это связано с необходимостью создания объекта, отсутствующего ранее в природе и технике, для моделирования.

Вторым этапом является построение физической модели, заключающейся в определенной идеализации свойств конструкции, изготовленной из реального материала и находящейся под воздействием внешних нагрузок (рисунок 3.8).

Третьим этапом является построение математической модели. Модель конструкции рамы тележки была разбита на сетку конечных элементов, соединенных между собой в узлах (рисунки 3.9, 3.10). Как было отмечено выше, модель состоит из конечных элементов двух основных типов: четырёхузловых оболочечных и восьмиузловых объемных. Все конечные элементы линейные, то есть первого порядка. Такие элементы имеют прямые стороны, а узлы располагаются только в углах. Построение сетки конечных элементов произведено методом произвольной сетки, который выполняется автоматически, при этом соседние элементы могут отличаться друг от друга по размерам. Применялся h -метод конечно-элементного анализа, в котором определяющим является длина стороны конечного элемента h , в отличие от p -метода, определяемым порядком полинома аппроксимирующей функции p . Для повышения точности результатов в h -методе увеличивают число элементов.

В построенной модели размеры типичных конечных элементов следующие: объемные с высотой куба примерно 10 мм, плоские (оболочечные) размером примерно 50x50 мм. При выявлении проблемных зон после первого этапа расчета проводилось дополнительное моделирование с заменой оболочечных элементов на объемные. Сетка конечных элементов модели состоит из 21 293 элементов, количество узлов составляет 26 148.

Задание граничных условий, то есть приложение граничных (в узлах) нагрузок, в применяемом расчетном комплексе выполняется автоматически.

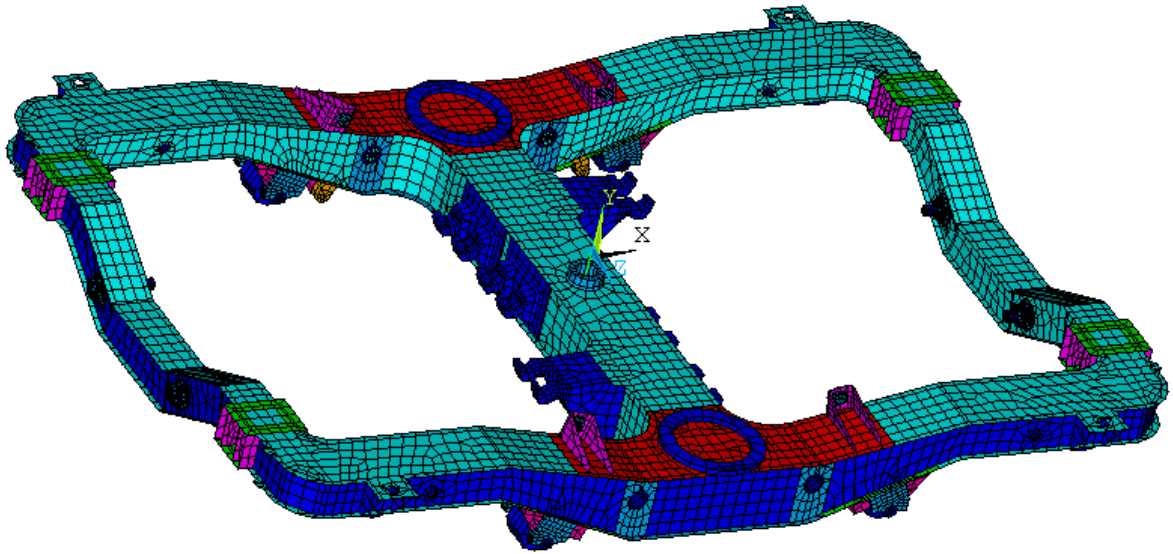


Рисунок 3.9 – Вид рамы тележки с сеткой конечных элементов

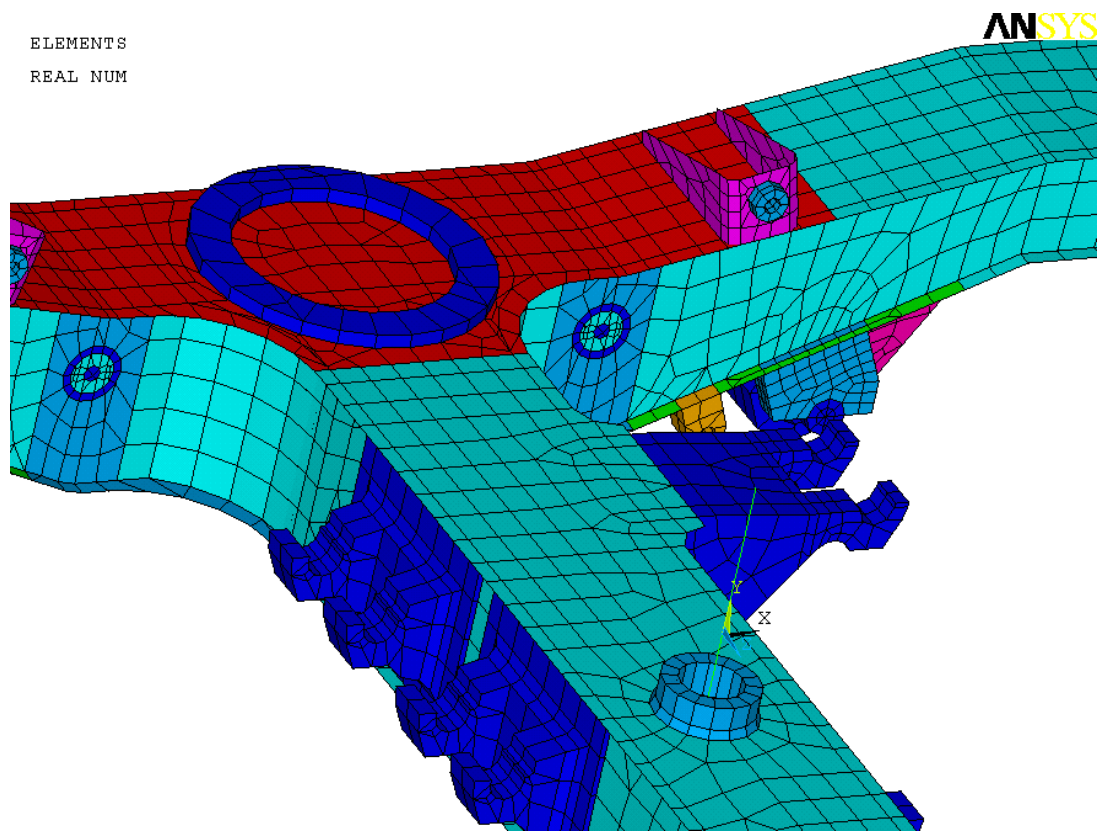


Рисунок 3.10 – Конечно-элементная сетка узла соединения продольной и центральной балок рамы тележки

Численные методы расчета, в том числе метод конечных элементов, являются прогрессивными методами, применяемыми, как в современной науке, например, физике твердого тела и технических науках, так и в инженерных расчетах. Однако, физическое и математическое моделирование с использованием любого численного метода не является в науке и технике гарантией получения истинного результата. Выделим наиболее важные на наш взгляд обстоятельства, повышающие вероятность ошибок:

1 Человеческий фактор, обусловленный опытом и теоретическими знаниями специалиста, определяющий качество построенной модели (учет существенных факторов и пренебрежение несущественными).

2 На этапе моделирования понимание исследователем конструкции существенно связано с интуитивным ее постижением. Один из основных вопросов заключается в решении вопроса о том, какая часть конструкции должна изучаться более подробно. В таких сложных, статически неопределимых системах, как рамы тележек, очевидно, вследствие перераспределения напряжений, а также ввиду необходимости выделения для изучения концентраторов напряжений конструктивного и технологического характера, не удастся предварительно выделить и исследовать все эти зоны, что приводит к снижению точности результатов.

3 Вероятность ошибок, возможных при конечно-элементном моделировании, например, несоответствие выбранного типа конечного элемента или его размера физическому поведению материала в конструкции.

Моделирование рамы тележки проводилось с учетом ряда факторов, которые, на наш взгляд, существенно снижают вероятность ошибочных результатов:

- наличие полного пакета КД, разработанной с учетом предыдущего конструирования и опыта эксплуатации, что дает возможность моделирования реального объекта, а не виртуальной, непроработанной детально, конструкции;

- учет в физической модели нагрузок, максимально приближенных к реальным благодаря большой базе информации, полученной при экспериментальных исследованиях конструкции-прототипа;

- определение в математической модели зон более подробного исследования благодаря анализу предыдущих расчетов, испытаний, опыта эксплуатации;
- накопленный опыт предыдущего математического моделирования и испытаний конструкции-прототипа, сравнительный анализ их результатов.

Расчет рамы тележки согласно требованиям Норм должен производиться по допускаемым напряжениям и на сопротивление усталости. Расчет выполнен для семи отдельных режимов нагружения и двух суммарных эксплуатационных режимов Па и Пб. Расчетные нагрузки приведены в таблице 3.5. Принятое направление осей координат: X – продольная; Y – вертикальная; Z – боковая.

Таблица 3.5 – Расчетные нагрузки

Номер режима нагружения	Нагрузка
1	Вертикальная статическая нагрузка
2	Вертикальная динамическая нагрузка
3	Кососимметричная нагрузка
4	Нагрузка от работы электродвигателей и редукторов
5 _{Па}	Нагрузка от масс электродвигателей, редукторов и их инерционных сил для режима Па
5 _{Пб}	Нагрузка от масс электродвигателей, редукторов и их инерционных сил для режима Пб
6 _{Па}	Нагрузка от сил инерции при трогании и торможении для режима Па
6 _{Пб}	Нагрузка от сил инерции при трогании и торможении для режима Пб
7	Вписывание в кривую

Суммарный режим Па складывается из нагружений: $1+2+3+4+5_{Па}+6_{Па}+7$.

Суммарный режим Пб складывается из нагружений: $1+3+4 \times (2)+5_{Пб}+6_{Пб}$.

Основные результаты конечно-элементного моделирования рамы тележки приведены ниже. Методика прочностного расчета приведена в приложении В.

Вертикальная статическая нагрузка на раму тележки складывается из брутто кузова, приходящегося на пневморессоры тележки, и веса обрессоренных частей тележки. Вес обрессоренных частей тележки учтён в конечно-элементной модели. Схема нагружения представлена на рисунке 3.11.

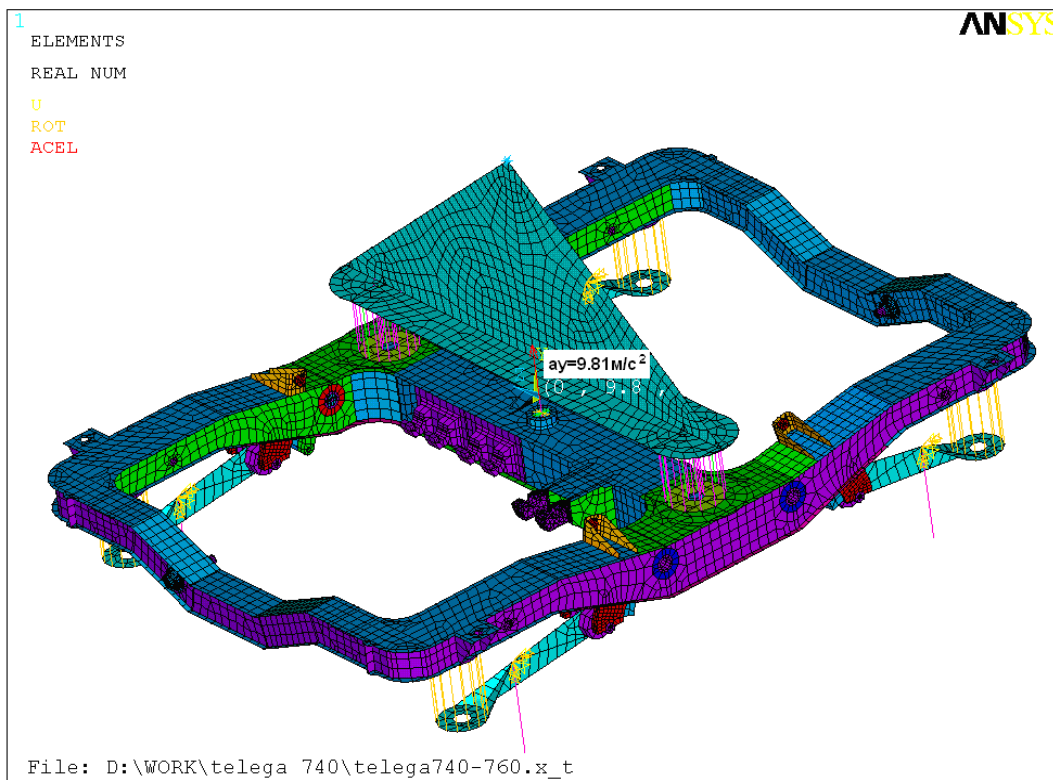


Рисунок 3.11 – Схема нагружения конечно-элементной модели рамы тележки вертикальной статической нагрузкой

Вертикальная динамическая нагрузка вызвана колебаниями масс вагона и равна произведению силы тяжести брутто на расчётный коэффициент вертикальной динамики. Схема нагружения вертикальной динамической нагрузкой представлена на рисунке 3.12.

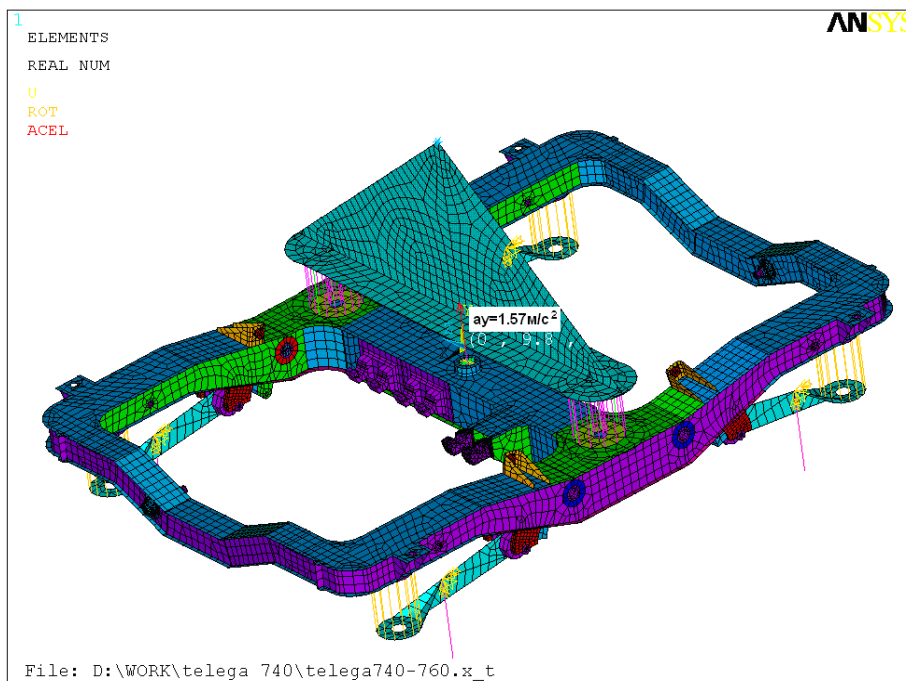


Рисунок 3.12 – Схема нагружения конечно-элементной модели рамы тележки вертикальной динамической нагрузкой

Кососимметричная нагрузка, возникающая от усилий, скручивающих раму из-за несимметричных факторов, неровности пути, допусков на изготовление, износа отдельных элементов тележки. Так как жесткостные характеристики буксового подвешивания учтены в модели, то кососимметричная нагрузка задается перемещением осей колёс в вертикальном направлении $u_y = (\pm 5)$ мм. Схема нагружения представлена на рисунке 3.13.

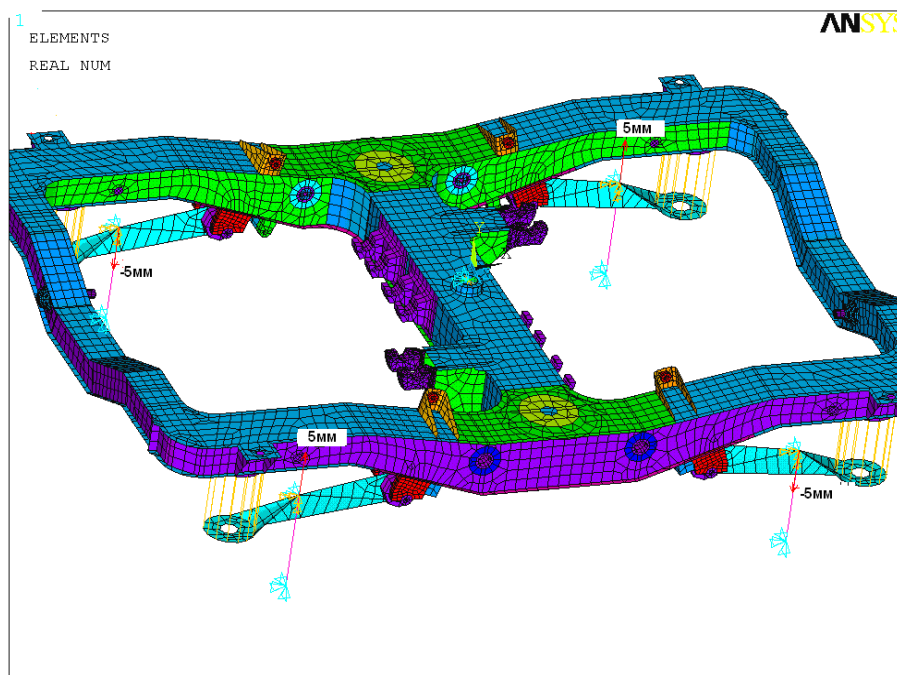


Рисунок 3.13 – Схема нагружения конечно-элементной модели кососимметричной нагрузкой

Нагрузки от работы тягового привода. Каждый из двух тяговых электродвигателей имеет три точки крепления (с резинометаллическими шарнирами) на раме тележки: два кронштейна на центральной балке, третий кронштейн расположен на концевой балке (рисунок 3.14).

Привод имеет опорно-осевое расположение редуктора. Корпус редуктора с одной стороны через подшипники опирается на ось колесной пары, а со стороны ведущей шестерни через шарнирную тягу крепится к редукторному кронштейну на центральной балке рамы тележки (рисунок 3.15).

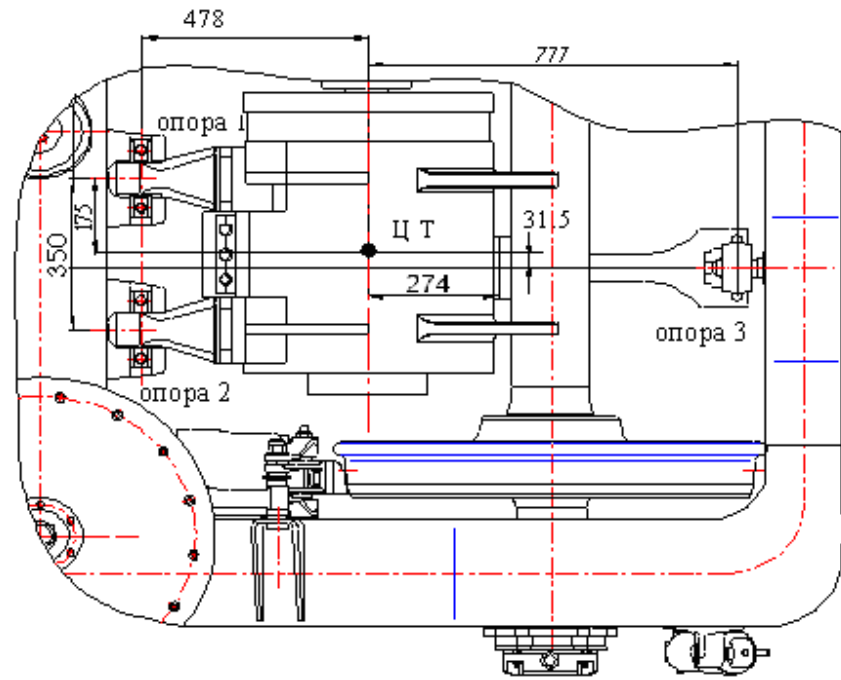


Рисунок 3.14 – Схема подвески тягового двигателя

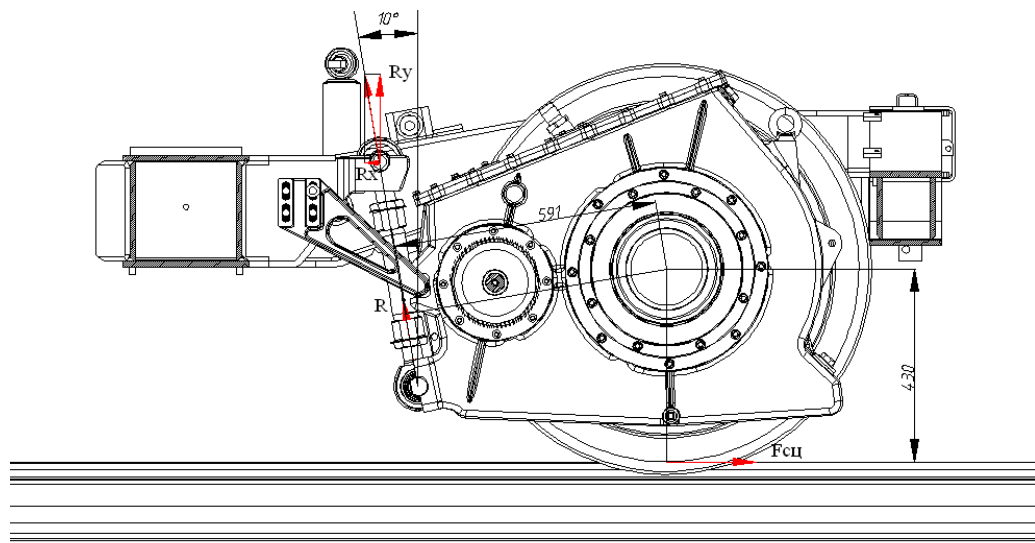


Рисунок 3.15 – Схема подвески редуктора

Схема нагружения рамы тележки нагрузками от работы тягового привода представлена на рисунке 3.16.

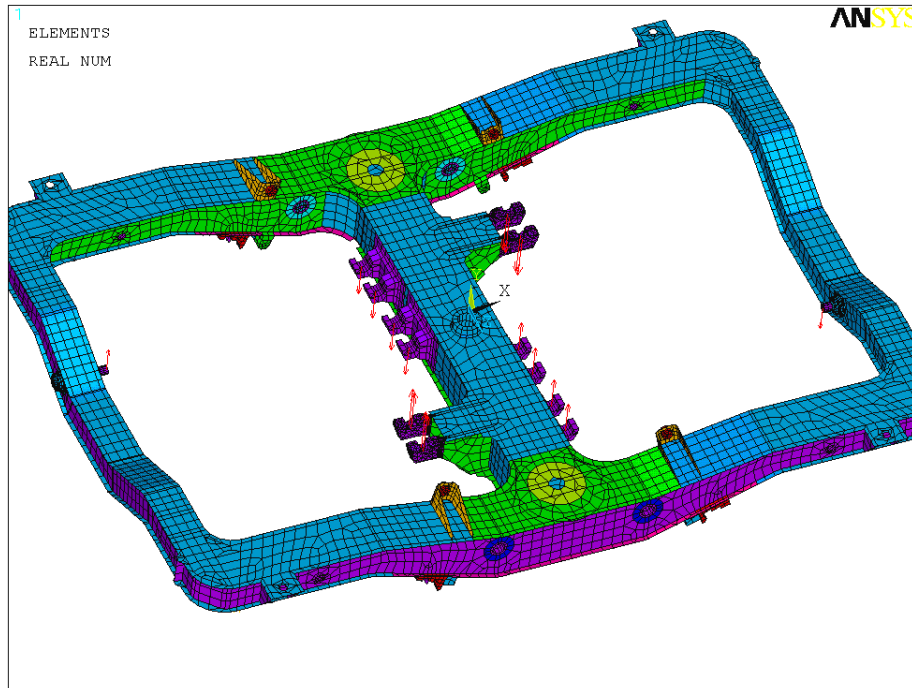


Рисунок 3.16 – Схема нагружения конечно-элементной модели нагрузками от работы привода

Вертикальные нагрузки от веса двигателей, веса редукторов и их инерционных масс. Схема нагружения рамы от вертикальных сил инерции двигателей и редукторов представлена на рисунке 3.17.

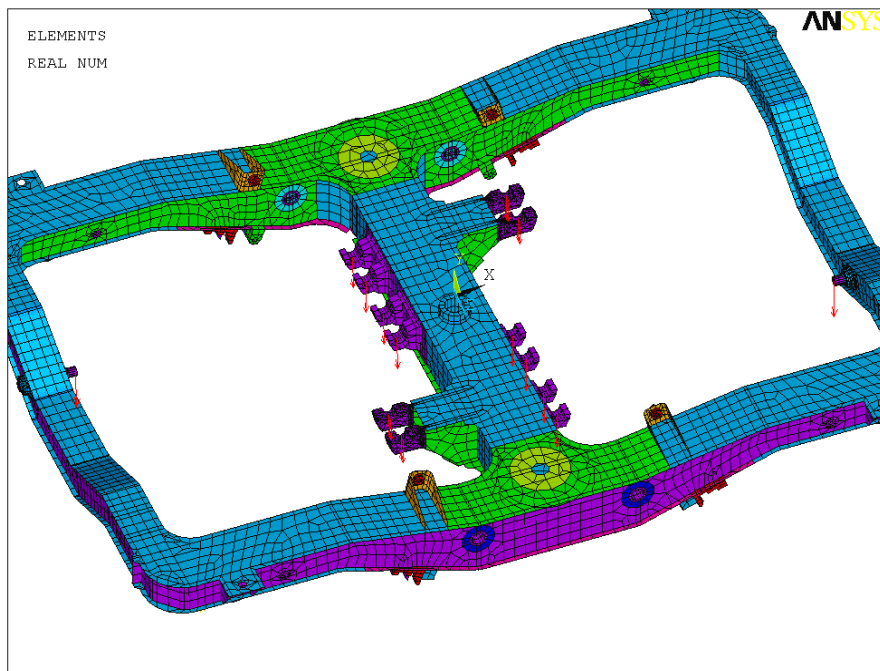


Рисунок 3.17 – Схема нагружения конечно-элементной модели рамы тележки силами инерции (вертикальными) двигателей и редукторов

Нагрузка от продольных сил инерции кузова. При продольном ускорении (замедлении) на раму тележки действуют: горизонтальная сила инерции половины кузова, инерция самой тележки, а также вертикальная сила, связанная с опрокидывающим моментом (Приложение В).

Схема нагружения модели рамы тележки нагрузками от продольных сил инерции представлена на рисунке 3.18.

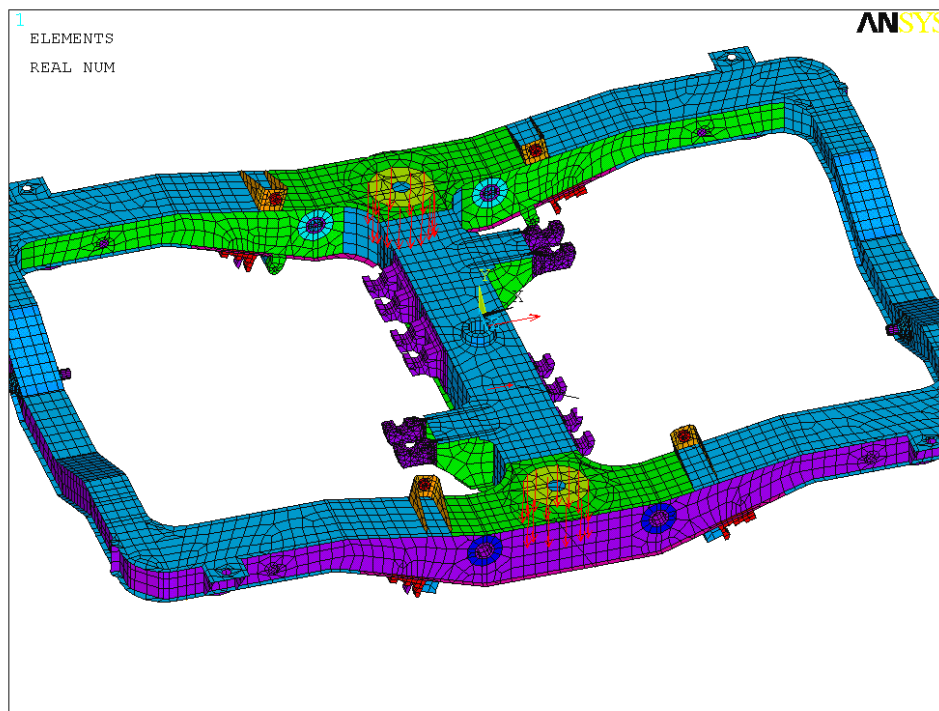


Рисунок 3.18 – Схема нагружения конечно-элементной модели рамы тележки нагрузками от продольных сил инерции

Боковая нагрузка от динамического вписывания в кривую. Боковые силы определяются центробежной силой кузова и тележки, силой давления ветра и динамическим взаимодействием колес с рельсом в горизонтальной плоскости.

Схема приложения боковой нагрузки от вписывания в кривую на раму тележки представлена на рисунке 3.19.

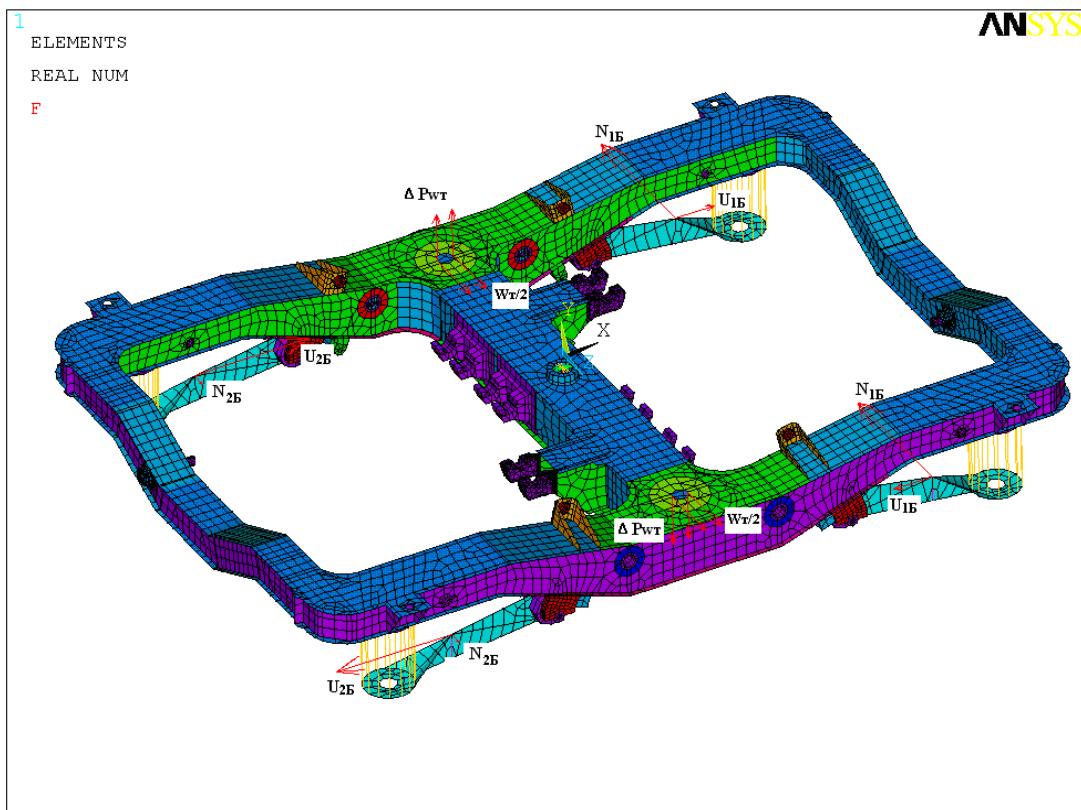


Рисунок 3.19 – Схема нагружения конечно-элементной модели при вписывании в кривую

Результаты расчета. Распределения эквивалентных напряжений в раме тележки для отдельных режимов нагружения приведены на рисунках 3.20 – 3.29. Распределения эквивалентных напряжений в раме тележки для режимов Па и Пб приведены на рисунках 3.30 – 3.33.

Итак, расчет показал следующее. Максимальные эквивалентные напряжения возникают:

- при режиме Па в вертикальном листе рамы тележки в зоне среднего тормозного кронштейна (средней точки крепления блок-тормоза) $\sigma = 175$ МПа (рисунок 3.31);

- при режиме Пб в аналогичном месте рамы $\sigma = 168$ МПа (рисунок 3.33).

Максимальные напряжения не превышают допускаемых $[\sigma] = 180$ МПа.

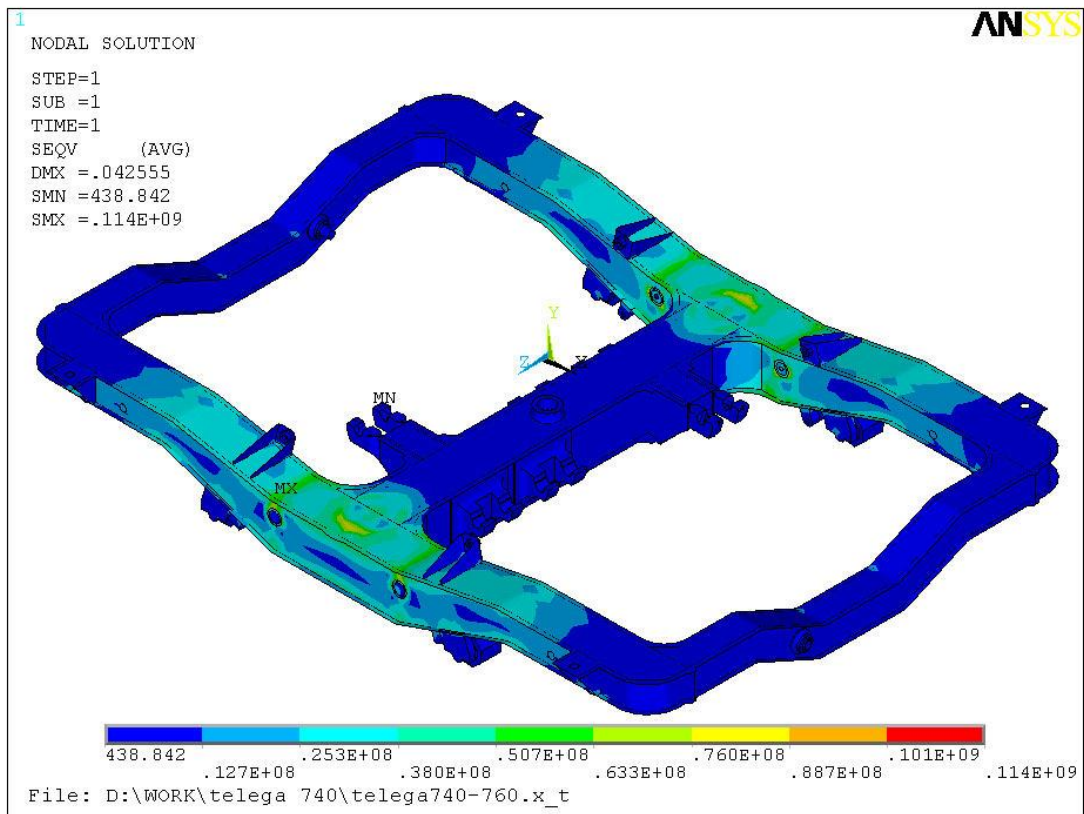


Рисунок 3.20 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки, Па.
Режим нагружения – вертикальная статическая нагрузка

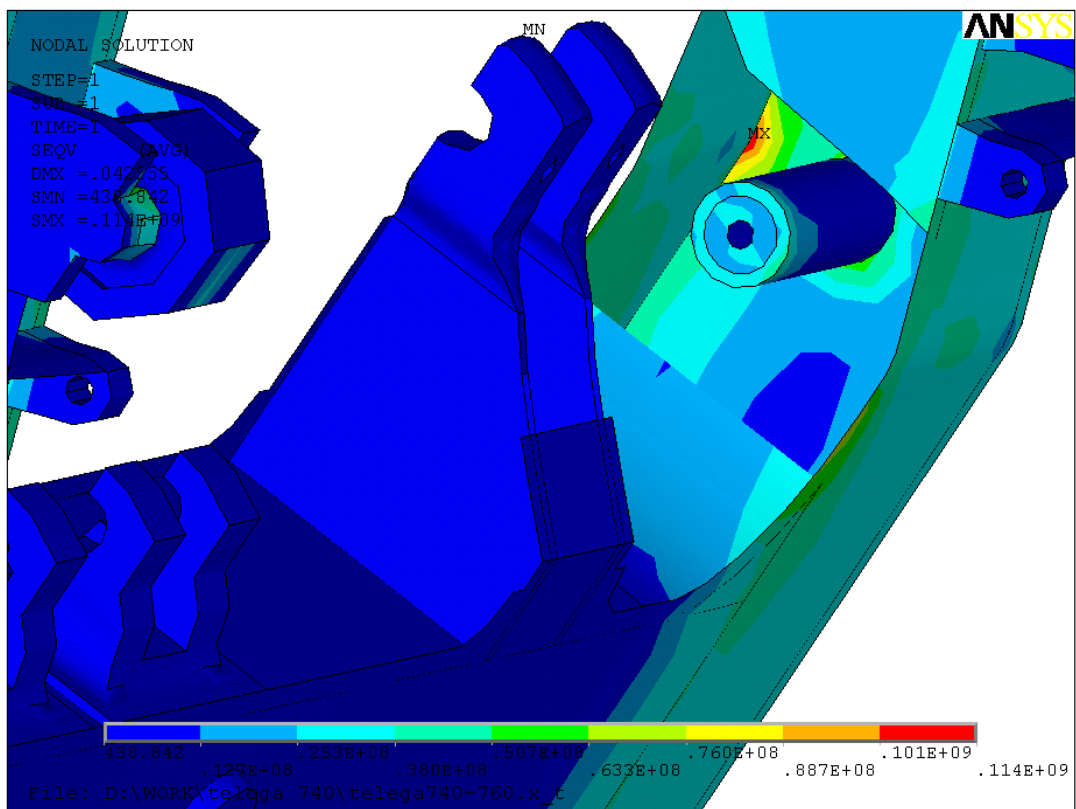


Рисунок 3.21 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в зоне максимальных напряжений при режиме нагружения от вертикальной статической нагрузки, Па

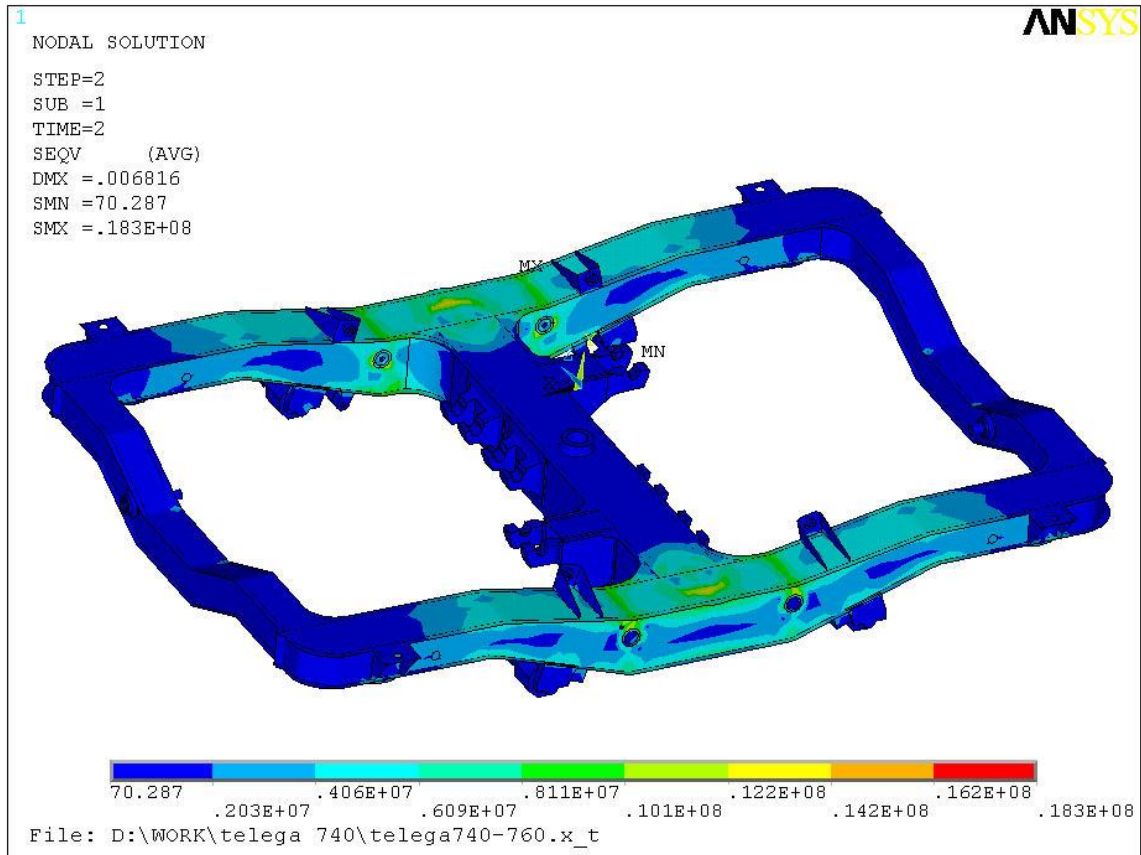


Рисунок 3.22 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки, Па.
Режим нагружения – вертикальная динамическая нагрузка

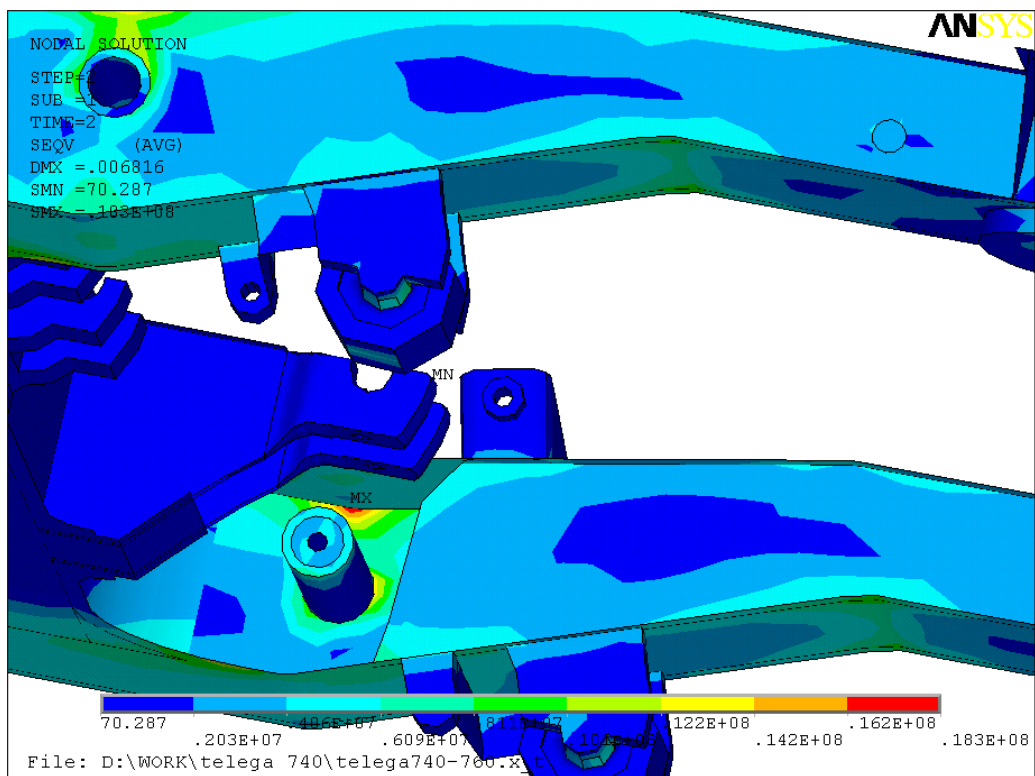


Рисунок 3.23 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в зоне максимальных напряжений при режиме нагружения от вертикальной динамической нагрузки, Па

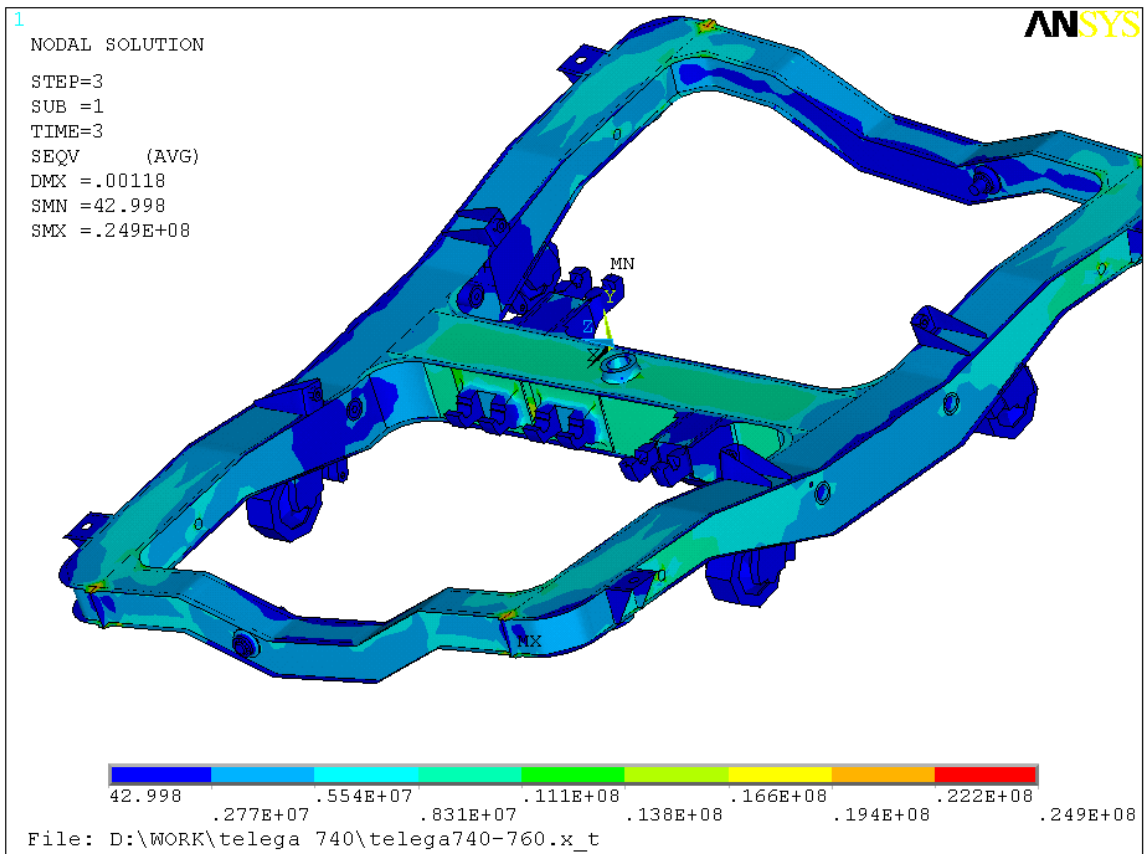


Рисунок 3.24 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки, Па.
Режим нагружения – кососимметричная нагрузка

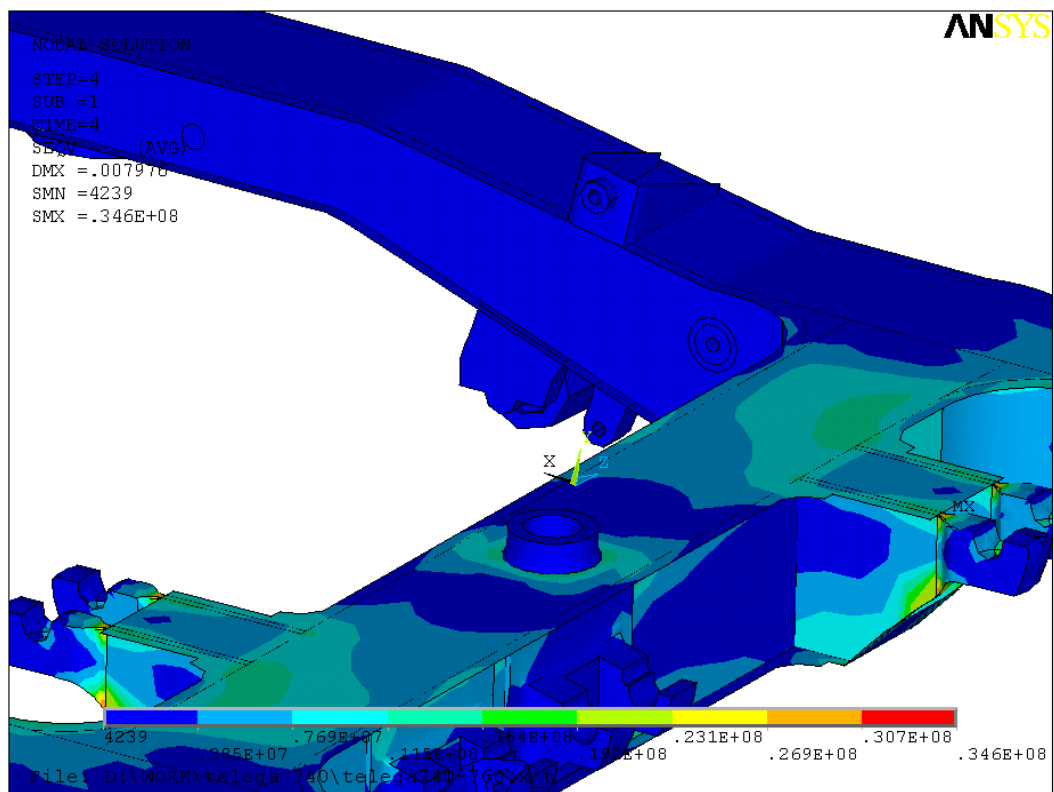


Рисунок 3.25 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки для зоны максимальных напряжений при режиме от работы тягового привода (режим Па), Па

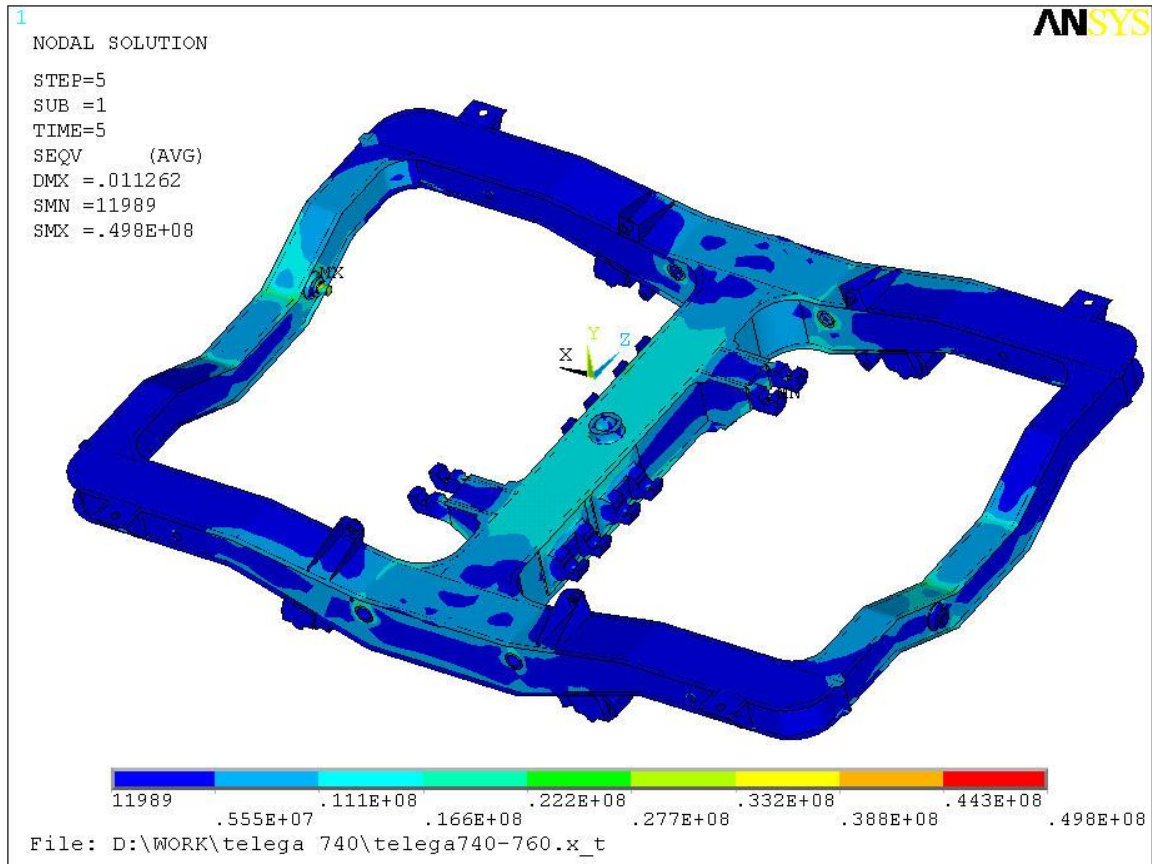


Рисунок 3.26 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки, Па.
Режим нагружения – инерционные нагрузки от веса привода (режим Па)

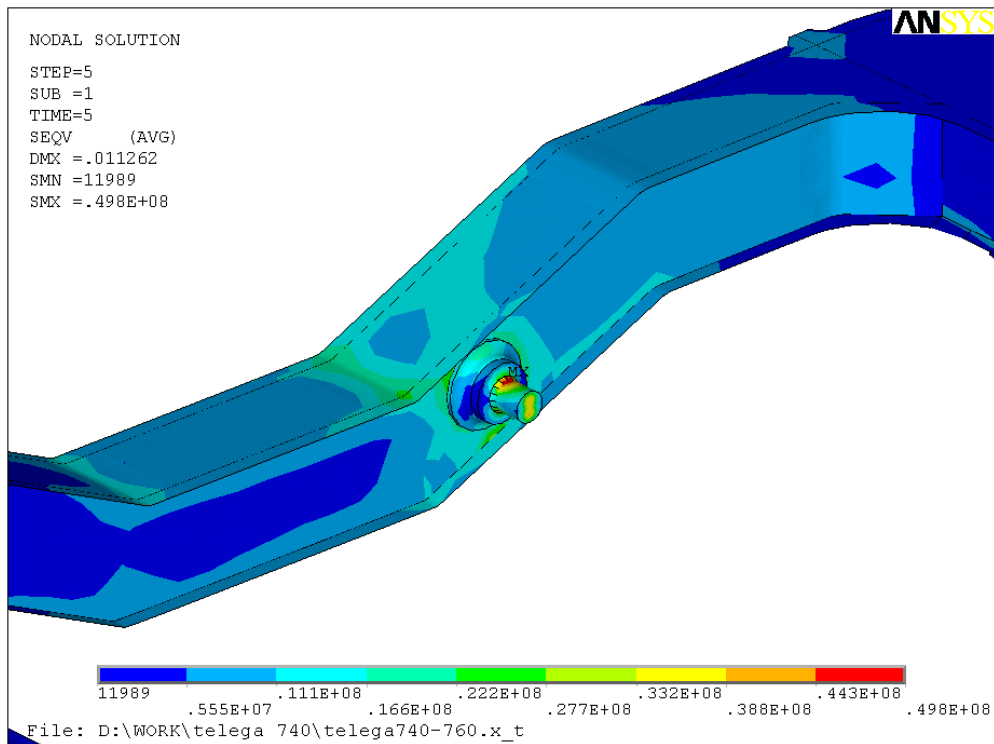


Рисунок 3.27 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки для зоны максимальных напряжений при режиме инерционных нагрузок от веса привода (режим Па), Па

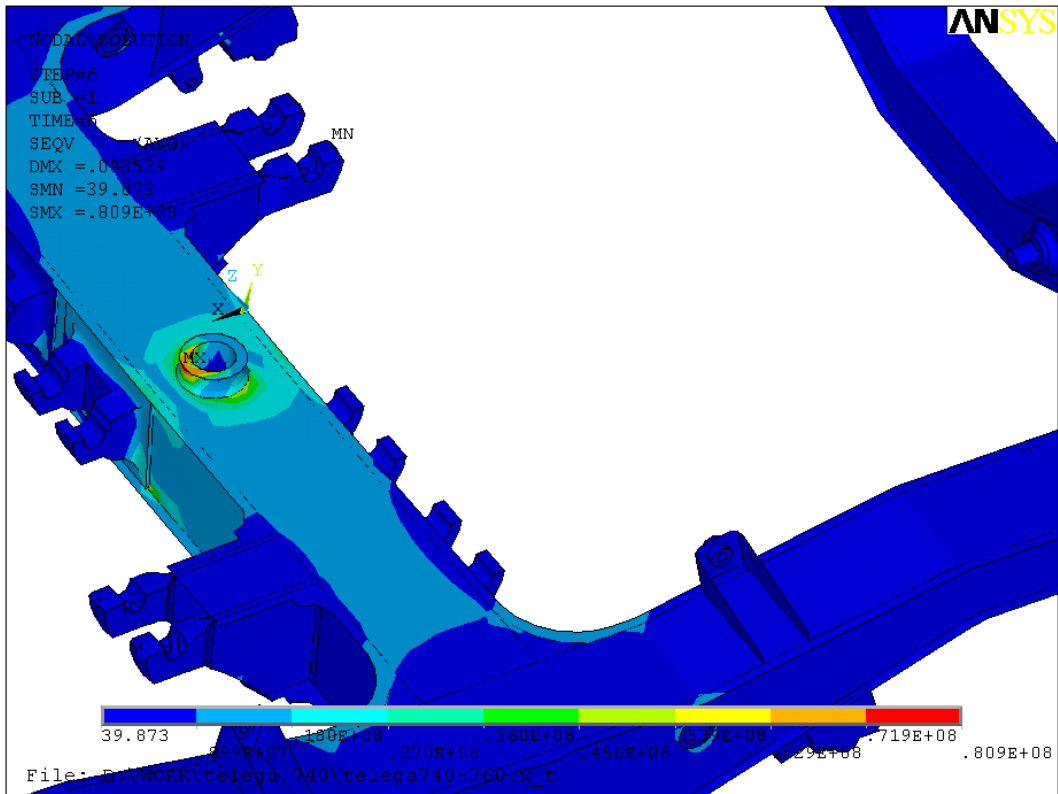


Рисунок 3.28 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки, Па.
 Режим нагружения – нагрузка от продольных сил инерции кузова (режим Па)

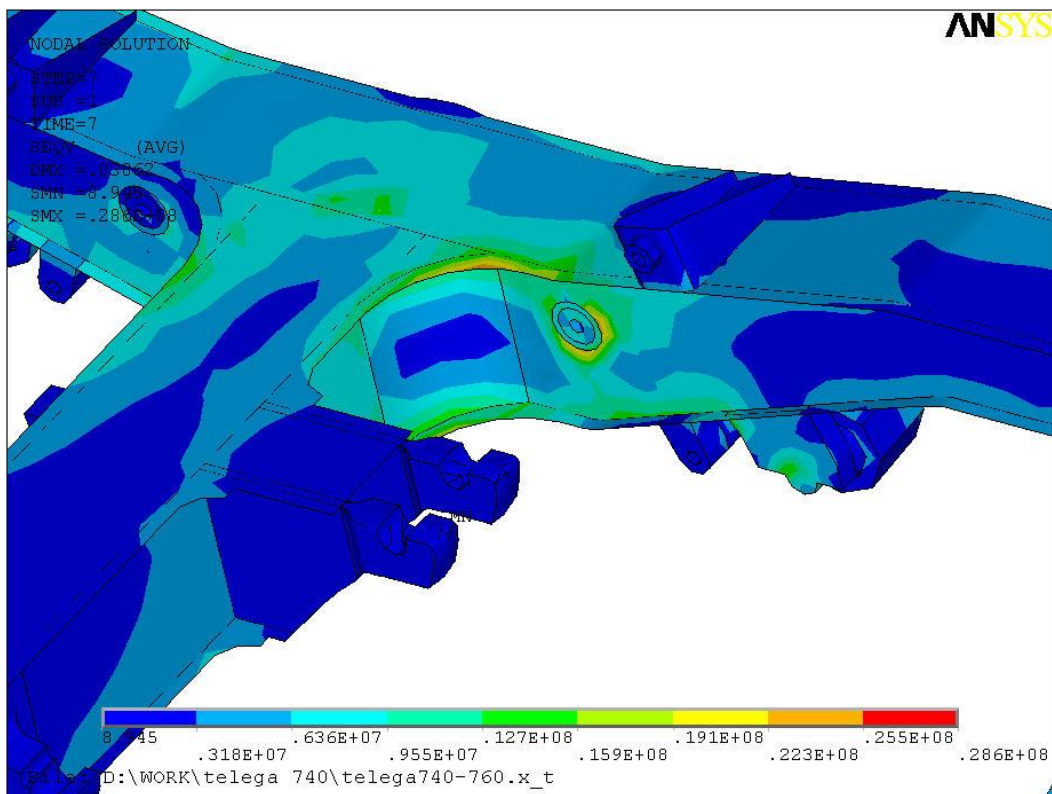


Рисунок 3.29 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки для зоны максимальных напряжений при режиме вписывания в кривую, Па

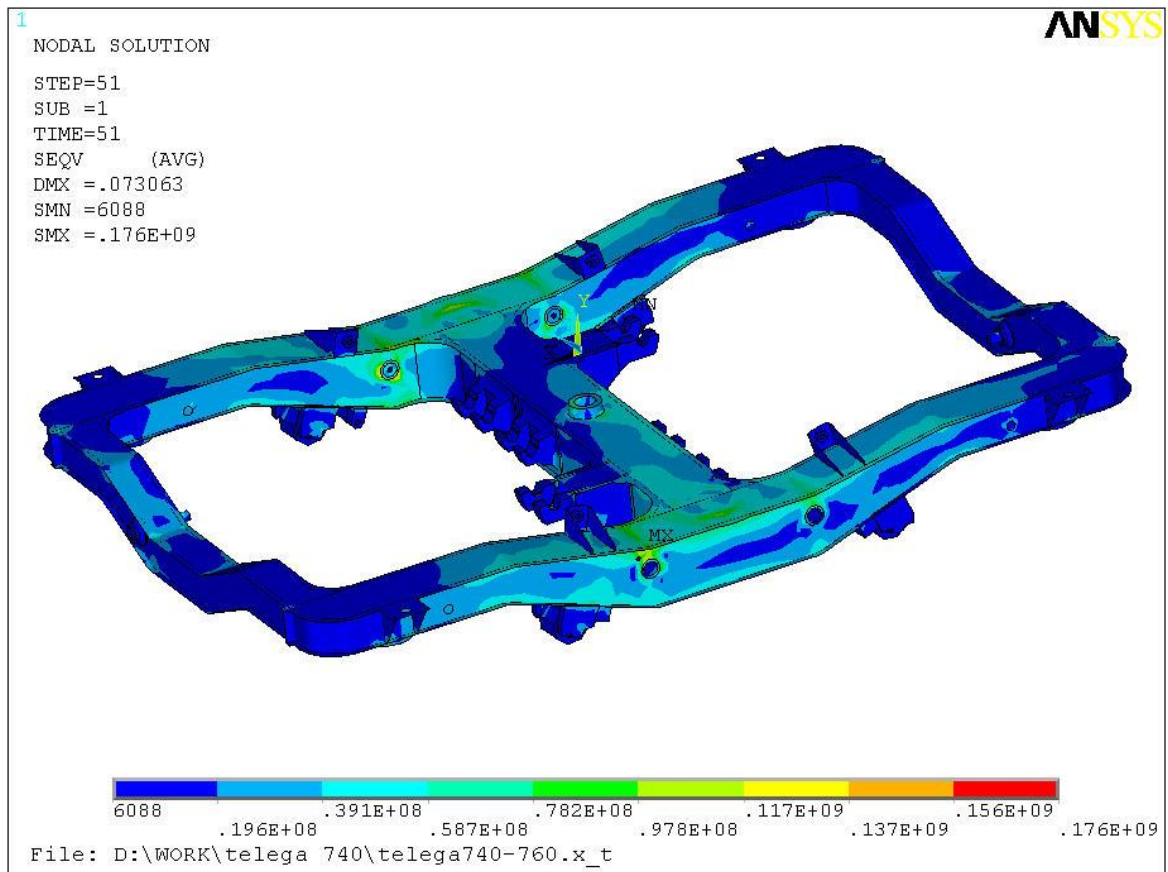


Рисунок 3.30 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки, режим нагружения Па, Па

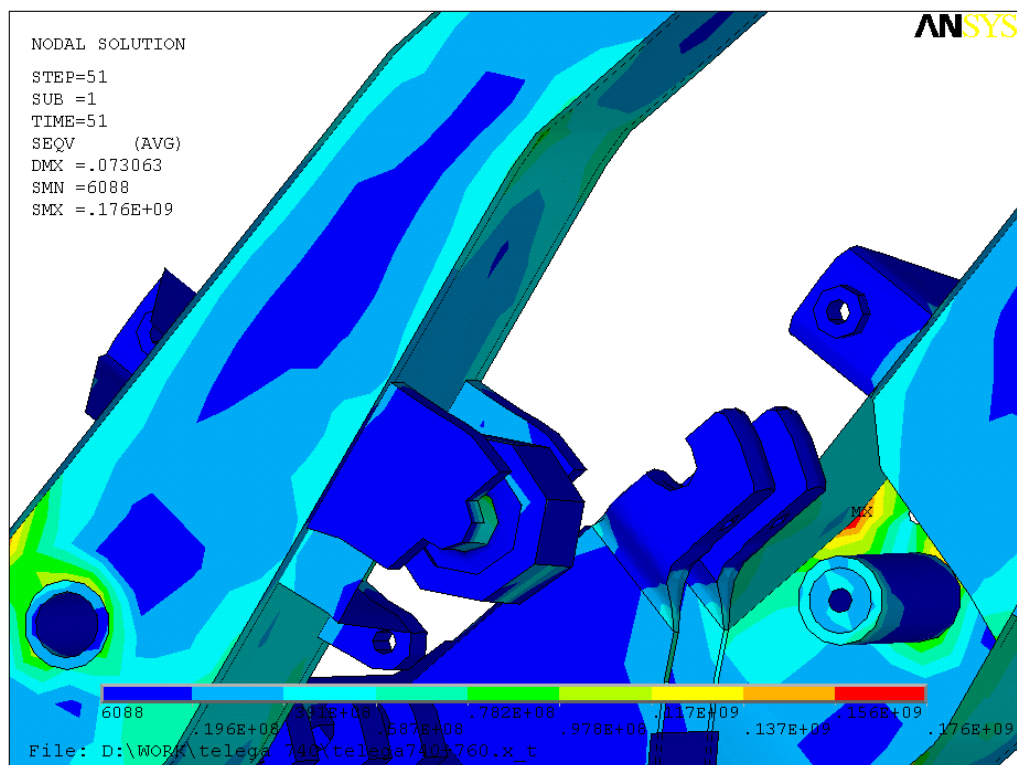


Рисунок 3.31 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в зоне максимальных напряжений рамы тележки, режим нагружения Па, Па

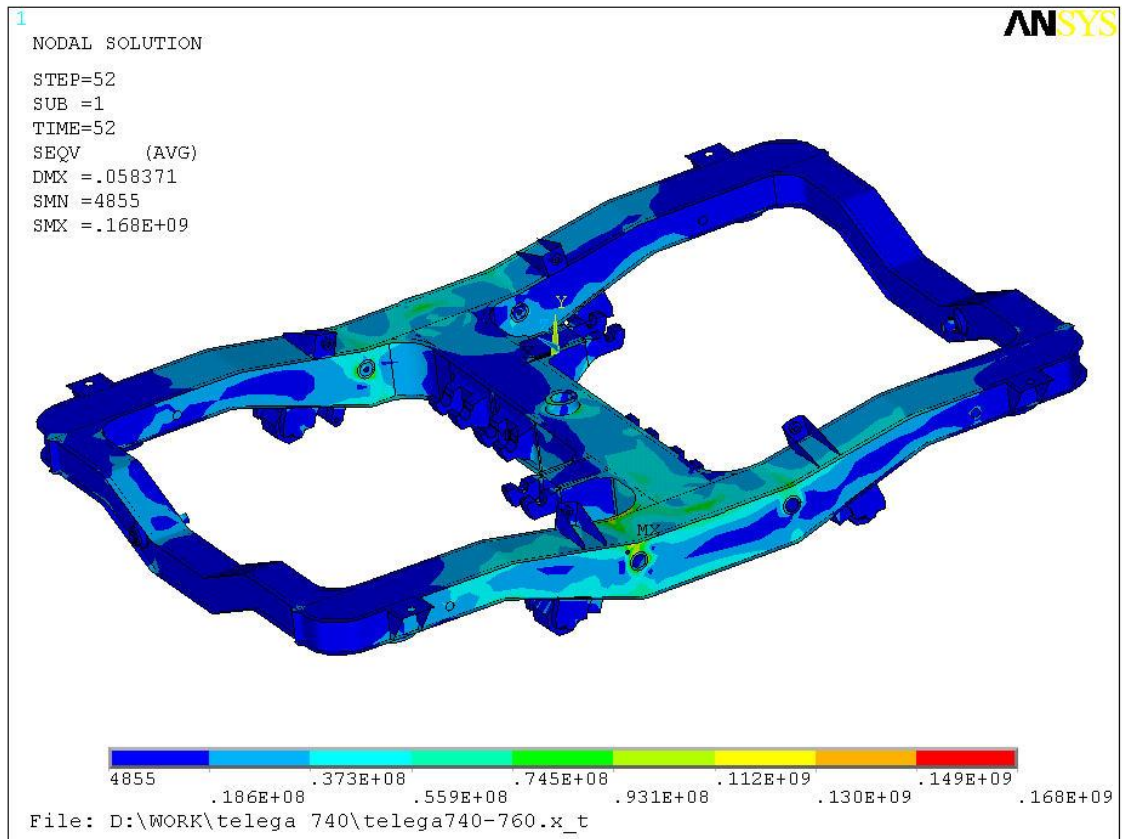


Рисунок 3.32 – Распределение эквивалентных напряжений в раме тележки по Мизесу, режим нагружения Пб, Па

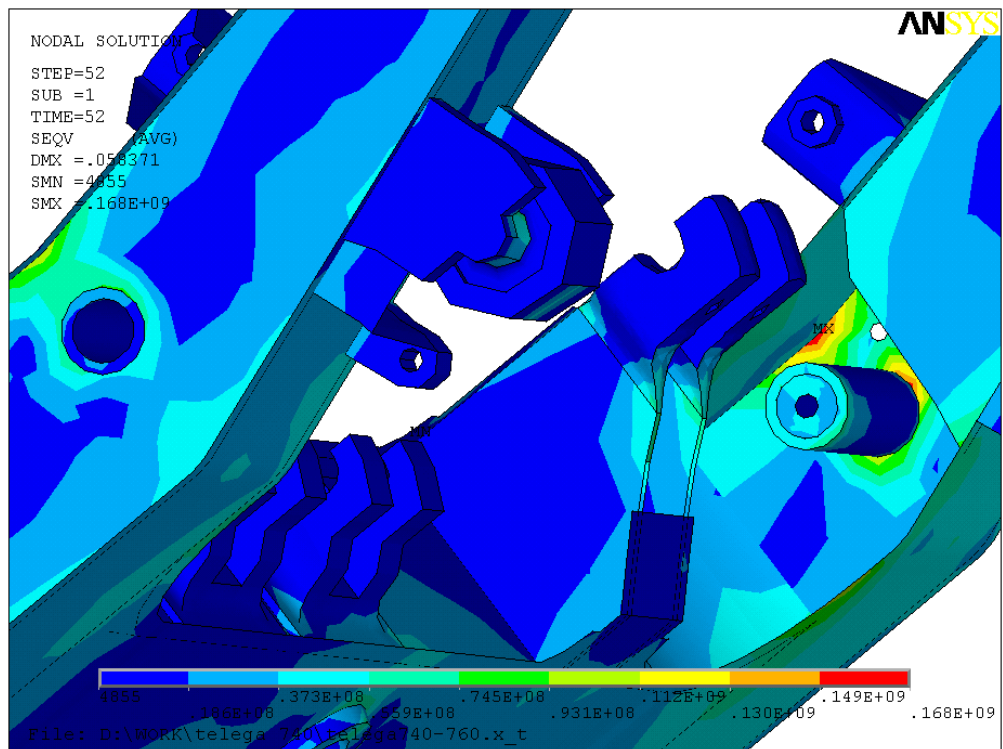


Рисунок 3.33 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в зоне максимальных напряжений в раме тележки, режим нагружения Пб, Па

Согласно Нормам [62] оценка прочности производится не только по допускаемым напряжениям, но и на сопротивление усталости. Коэффициент запаса сопротивления усталости определяется по формуле

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma} \cdot \sigma_v + \psi \cdot \sigma_m} > [n], \quad (3.1)$$

где σ_{-1} – среднее значение предела выносливости стандартного образца при симметричном цикле нагружения;

K_{σ} – коэффициент, характеризующий понижение предела выносливости конструкции по отношению к пределу выносливости стандартного образца;

σ_v – амплитуда динамических напряжений;

σ_m – среднее напряжение цикла;

ψ – коэффициент, характеризующий влияние асимметрии цикла; при $\sigma_m > 0$ $\psi = 0,3$, при $\sigma_m < 0$ $\psi = 0$.

Значение коэффициента понижения предела выносливости определяется из выражения

$$K_{\sigma} = \frac{K_1 \cdot K_2}{\gamma \cdot m} \cdot \beta_K, \quad (3.2)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий влияние неоднородности материала детали, для проката $K_1 = 1,1$;

K_2 – коэффициент, учитывающий влияние внутренних напряжений в детали, его величина зависит от размера детали, принимаем $K_2 = 1,0$;

m – коэффициент, учитывающий состояние поверхности детали; с учетом масштабного фактора рамных конструкций и чертежных шероховатостей поверхностей (Ra 12,5 и выше) принимаем $m = 0,9$ (чистая станочная обработка);

γ – коэффициент, учитывающий влияние размерного фактора, $\gamma = 0,85$;

β_K – эффективный коэффициент концентрации напряжений, принимаем $\beta_K = 1,2$;

$[n]$ – допустимый коэффициент запаса сопротивления усталости, для рам тележек согласно [62] должен быть $[n] = 2$.

Подставляя численные значения, получаем

$$K_{\sigma} = \frac{1,1 \cdot 1,0}{0,85 \cdot 0,9} \cdot 1,2 = 1,72$$

Значения амплитуд максимальных напряжений в вертикальном листе в зоне приварки тормозного кронштейна для режима Па приведены в таблице 3.6. Напряженное состояние в исследуемой зоне является сжатием, то есть является отрицательной величиной. Поэтому коэффициент $\psi = 0$.

Таблица 3.6 – Значения амплитуд максимальных напряжений

Номер режима нагружения	Наименование	Максимальное эквивалентное напряжение, МПа
1	Вертикальная статическая нагрузка (брутто)	85,4
2	Вертикальная динамическая нагрузка	13,7
3	Кососимметричная нагрузка	6,34
4	Нагрузка от работы тяговых двигателей и редукторов	19,9
5	Нагрузка от масс тяговых двигателей, редукторов и их инерционных сил	27,1 (13,0 от статической нагрузки; 14,1 – от динамической)
6	Нагрузка от сил инерции при трогании и торможении	9,47
7	Вписывание в кривую	12,7
	Режим Па	175
	Среднее напряжение цикла в режиме движения по кривой σ_m	$85,4+9,47+12,7+13,0=120,57$
	Амплитуда динамических напряжений σ_v	$13,7+6,34+19,9+14,1=54,04$

Определяем коэффициент запаса сопротивления усталости в самой нагруженной зоне:

$$n = \frac{210}{1,72 \cdot 54,04} = 2,26 > [n] = 2$$

Таким образом, теоретическое исследование рамы тележки, выполненное методом конечных элементов, показало, что спроектированная рама тележки для перспективного вагона метрополитена обладает требуемыми прочностными характеристиками.

Примечание - Выполненная оценка коэффициента запаса сопротивления усталости на данном этапе весьма приближенная и должна уточняться по результатам испытаний. Используемые при расчете данные несколько отличаются от приведенных в [77], что связано с появлением уточняющей информации после выхода статьи без влияния на результаты расчета.

3.5 Прочностной и конструкторско-технологический анализ новой конструкции рамы тележки

Итак, разработана новая конструкция рамы тележки и выполнено ее теоретическое исследование методами физического и математического моделирования. Проведем анализ новой конструкции путем обсуждения основных результатов, полученных в главе 3 данного исследования.

Первый, практический, результат заключается в разработке реальной конструкции рамы тележки, подходящей по своим характеристикам для тележек перспективного вагона метрополитена современного мегаполиса. Данное заключение предварительно, так как оно должно быть подтверждено экспериментальными исследованиями. Тем не менее, имеет смысл проанализировать полученный технический объект, существующий на данном этапе исследования только в виде математической модели и комплекта КД. Можно сформулировать следующие положения:

- новая рама тележки по результатам теоретического исследования соответствует Нормам [63] (в 2010 году вышла новая редакция Норм) по прочностным характеристикам (максимальные эквивалентные напряжения $\sigma = 175 \text{ МПа} < [\sigma] = 180 \text{ МПа}$, коэффициент запаса сопротивления усталости в самой нагруженной зоне $n = 2,26 > [n] = 2$);

- новая рама имеет листовую конструкцию, более технологичную по сравнению со сварноштампованной, прежде всего на предмет возможности применения в большем объеме автоматической и полуавтоматической сварки, что позволяет существенно снизить влияние человеческого фактора, повысить качество сварных швов;

- в качестве материала применена сталь 09Г2Д, имеющая более высокие механические характеристики по сравнению со сталью 20;

- заложена термическая обработка рамы, позволяющая существенно снизить остаточные сварочные напряжения после сварки и повысить усталостную долговечность сварных швов.

Таким образом, новая конструкция рамы тележки сохранила положительные стороны конструкций рам тележек вагонов метрополитена моделей «Яуза» и «Русич». При этом была исключена слабая сторона конструкций тележек этих вагонов путем замены привода третьего класса на второй.

Теоретический результат проектирования связан с тремя положениями.

Во-первых, для получения требуемых прочностных характеристик и оптимального распределения действующих напряжений в разработанной конструкции максимально реализовано следующее. Конструирование производилось с приоритетом на построение оптимальных сечений балок в соответствии с действующими нагрузками. Выполнение подобной задачи стало возможным благодаря появлению современных расчетных комплексов (в данном случае ANSYS 10.0, реализующий метод конечных элементов).

Таким образом, современные методы моделирования позволили использовать преимущества коробчатых конструкций рам тележек, сформированных из стальных листов, по оптимизации их сечений. Конструктивно это достигается благодаря сочетанию трех конструкторских приемов:

- выбор различных толщин листов, формирующих коробчатое сечение балки;
- возможность изменения толщины листа по его длине, например способом механической обработки;
- изменение высоты (возможно также изменение ширины) сечения балки по ее длине.

Реализация этих методов показана на примере продольной балки новой рамы тележки (рисунок 3.34).

Необходимо отметить, что вышеуказанные приемы построения балок известны, однако, практика их применения носила в большей степени интуитивный характер, без четко поставленной задачи рационализация сечений балок. Это было связано с тем, что существовавшие методы расчетов, включая первые расчетные комплексы, реализующие МКЭ, не позволяли выполнять подобные задачи.

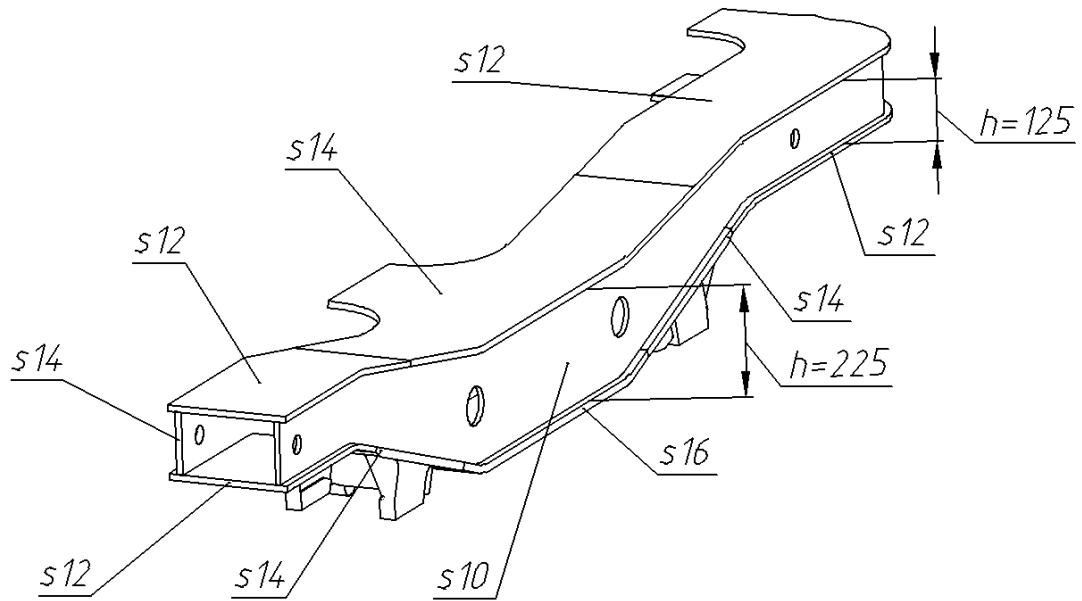
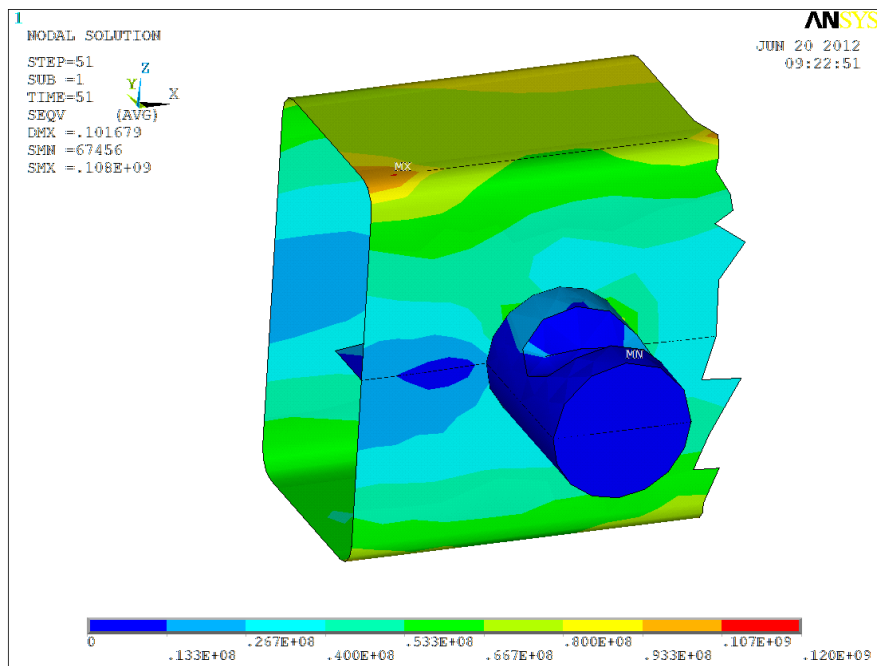
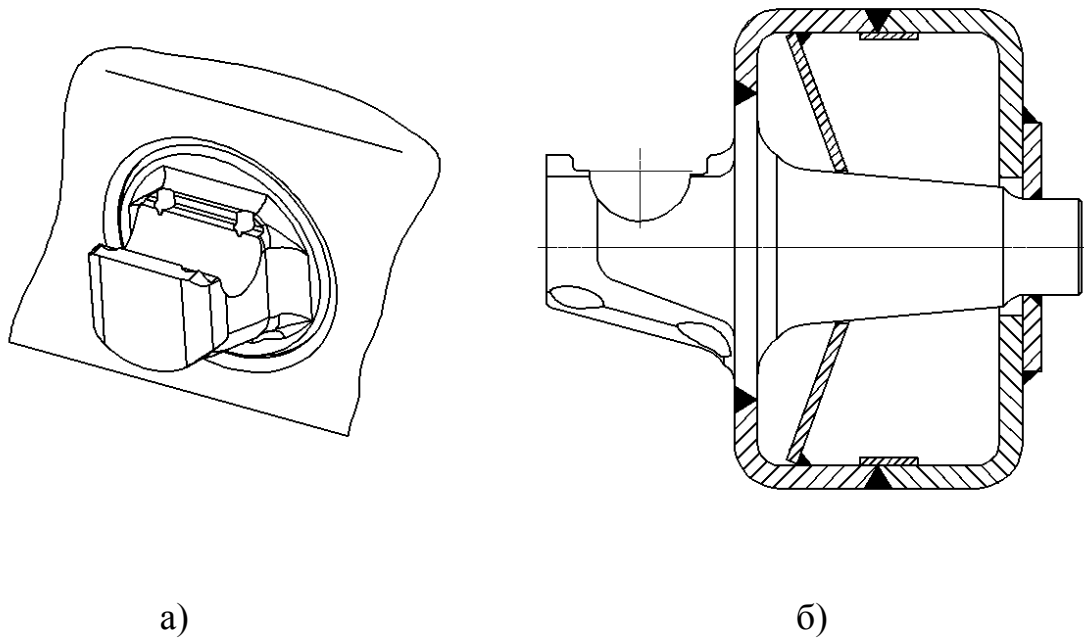


Рисунок 3.34 – Конструкторский принцип построения оптимальных сечений рамы тележки на примере продольной балки (условно показаны толщины s стальных листов, формирующих балку, и высота сечений балки h), размеры даны в миллиметрах

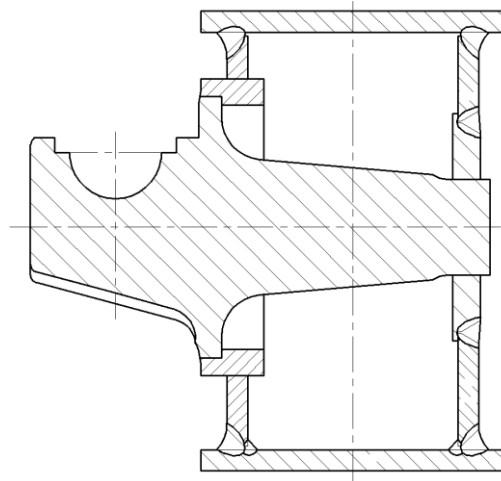
Во-вторых, при проектировании рамы тележки применено новое для отечественного метровагоностроения построение силовых кронштейнов рам тележек. Речь идет о кронштейнах двигателей и редукторов. Так в предыдущих конструкциях, в том числе на листовых рамах тележек, применялась другая конструктивная схема. Кронштейн состоял из цилиндрической части и головной части, предназначенной для крепления узла подвешивания тягового двигателя или редуктора. На рисунке 3.35, а, б и рисунке 3.36, а показаны общие виды кронштейнов старой конструкции соответственно сварноштампованной и листовой рам тележек. Заготовки кронштейнов производились способомковки или штамповки. Кронштейн устанавливался (вваривался) своей цилиндрической частью в отверстие балки рамы тележки. Как отмечалось в параграфе 2.3 трещинообразования кронштейнов двигателей и редукторов, а также мест их приварки составляют существенную часть отказов сварноштампованных рам тележек.



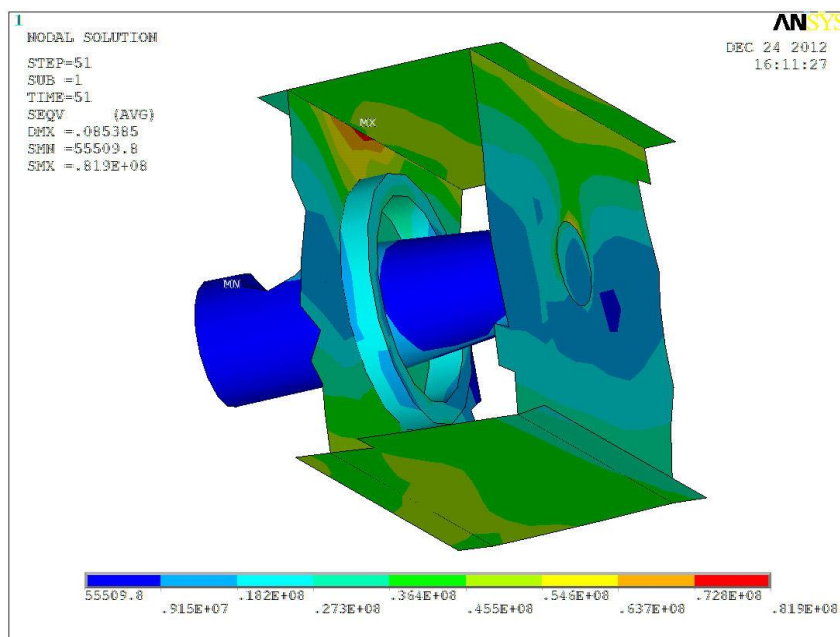
в)

Рисунок 3.35 – Конструкция моторного кронштейна шпинтонной сварноштампованной рамы тележки вагонов серий 81-717.5, 81-714.5:

а) общий вид кронштейна с наружной стороны поперечной балки; б) разрез по оси кронштейна; в) распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, Па



а)



б)

Рисунок 3.36 – Конструкция моторного кронштейна шпинтонной листовой рамы тележки вагонов серий 81-717.5, 81-714.5:

а) разрез по оси кронштейна; б) распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, Па

В новой раме применен принципиально другой подход. Например, моторные кронштейны представляют сварные конструкции, построенные из кованных заготовок (рисунок 3.37), выполненных, как одно целое с фрагментом одной вертикальной стенки балки, с отказом от принципа «протыкания» балки (без установки кронштейна в отверстия двух стенок балки). Это означает снижение концентраторов напряжений конструктивного характера путем отказа от старой схемы, у которой фактически к тонким несущим стенкам балки приваривался мас-

сивный кованный кронштейн, что означает резкое изменение сечения балки из-за приварки детали большой жесткости. Таким образом, у новой конструкции изменение сечений в зоне кронштейна происходит более плавно. Сказанное поясняют рисунки 3.35, в; 3.36, б; 3.38. У кронштейнов старых конструкций максимальные напряжения: 120 МПа (сварноштампованная рама), 82 МПа (листовая рама). У кронштейна новой конструкции максимальные напряжения составляют 56 МПа. При этом в приведенном примере на кронштейнах старой конструкции устанавливается тяговый двигатель мощностью 115 кВт, а на кронштейнах новой конструкции тяговый двигатель мощностью 170 кВт.

Также необходимо обратить внимание на следующее. При наличии явных положительных сторон предложенной конструкции кронштейнов, опыта эксплуатации подобных кронштейнов российские метрополитены не имеют. Рамы тележек зарубежного производства подобные конструкции эксплуатируют, однако за рубежом имеются совершенно другие условия эксплуатации. Также новые кронштейны проигрывают старым конструкциям на предмет ремонтпригодности. Поэтому, подобные конструкции подлежат дополнительным теоретическим и экспериментальным исследованиям.

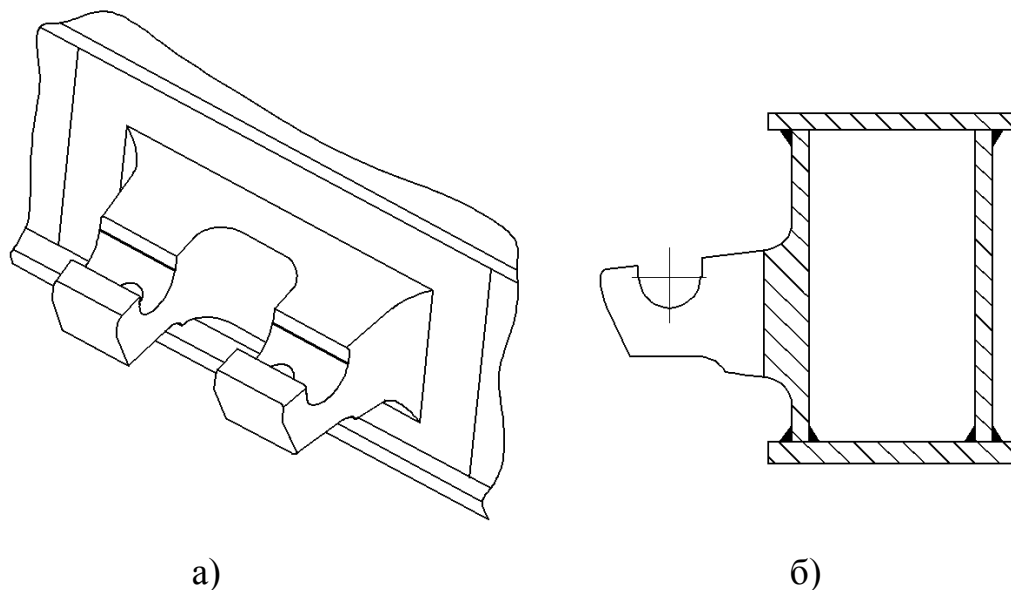


Рисунок 3.37 – Конструкция моторного кронштейна новой конструкции:
а) общий вид кронштейна с наружной стороны центральной балки; б) кронштейн в разрезе

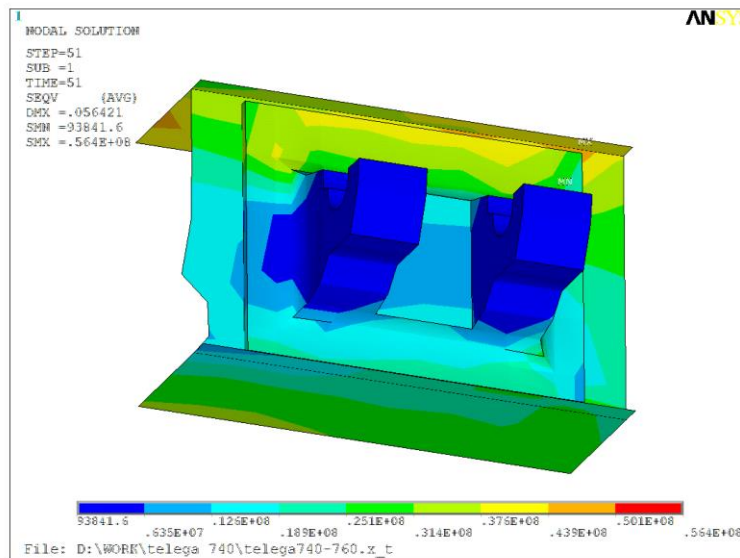


Рисунок 3.38 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в моторном кронштейне новой рамы тележки перспективного вагона, Па

В-третьих, в результате конечно-элементного моделирования и расчета рамы тележки максимальные эквивалентные напряжения определены в зоне среднего тормозного кронштейна (рисунки 3.31 и 3.33). Причины высоких напряжений, в принципе, понятны: кронштейн находится в зоне перегиба продольной балки; балка ослаблена отверстием, в которое вварен кронштейн, то есть имеет место концентратор напряжения из-за локального изменения жесткости балки; кронштейн находится близко от места соединения балок. Однако, с другой стороны выявляется определенная закономерность для рам тележек вагонов метрополитена. Это влияние тормозных приборов на напряженное состояние рамы тележки, например, в зоне средней шпинтонной втулки со стороны крепления блок-тормоза рамы тележки серии 81-717.5 (параграф 2.2), среднего тормозного кронштейна рамы новой конструкции. Этому вопросу, к сожалению, уделялось недостаточное внимание, так как считается, что неосновной (дотормаживающий) механический тормоз не оказывает существенного влияния на прочностные характеристики рам тележек.

Вышесказанное позволяет сформулировать следующие выводы к главе 3 настоящего исследования:

1 Листовые конструкции рам тележек (коробчатого сечения) теоретически перспективны на предмет реализации существующих норм, положений и реко-

мендаций по проектированию и изготовлению сварных рам тележек, что, прежде всего, обусловлено возможностью оптимального построения сечений балок и технологичностью конструкции.

2 Разработанная конструкция рамы тележки для перспективных вагонов метрополитена моделей 81-760, 81-761 соответствует по результатам теоретического исследования требованиям Норм [63]:

- определенные расчетом максимальные эквивалентные напряжение (на продольной балке в зоне крепления кронштейна блок-тормоза) $\sigma = 175$ МПа не превышают допускаемых $[\sigma] = 180$ МПа;

- определенный расчетом коэффициент запаса сопротивления усталости в самой нагруженной зоне больше допустимого коэффициента запаса сопротивления усталости $n = 2,26 > [n] = 2$.

3 Разработанная конструкция рамы тележки может быть рекомендована для изготовления опытных образцов и проведения экспериментальных исследований.

Примечание – В данной главе были приведены результаты расчетно-проектной части работы по созданию новой конструкции тележки перспективного вагона метрополитена, выполненные коллективом СКБ ОАО «Метровагонмаш», чьим сотрудником является диссертант.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ

4.1 Усталостные (стендовые вибрационные) испытания рамы тележки

В соответствии с принятой концепцией проектирования СКБ ОАО «Метровагонмаш» был разработан комплект КД на раму тележки 7600.31.20.010.

Во второй половине 2009 года ОАО «Метровагонмаш» изготовило два опытных образца рам тележек. На первом образце отрабатывалась технология изготовления и был проведен контроль геометрических размеров. Вторая рама подверглась стендовым испытаниям. Цель испытаний – проверка соответствия рамы тележки требованиям к прочности и долговечности, заложенным в Нормах [63]. Контролируемым показателем является базовое число циклов нагружения рамы тележки при действии нормативных нагрузок, равное 10^7 . Программа и методика испытаний разработана Испытательным центром технических и программных средств железнодорожного транспорта (ИЦ ТПС ЖТ) с учетом требований методики испытаний ТМ 38-02-09 «Рамы тележек и промежуточные рамы (балки) второй ступени рессорного подвешивания локомотивов и моторвагонного подвижного состава. Типовая методика сертификационных стендовых вибрационных испытаний». Испытания проводились в период с 2010-02-01 по 2010-04-26 на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ в корпусе РИС, г. Щербинка Московской области. В данном параграфе использованы результаты испытаний ИЦ ТПС ЖТ и ОАО «ВНИИЖТ» [29], [84].

Стендовые вибрационные испытания рамы тележки состояли из статических и вибрационных испытаний, проведенных на стенде вибрационных испытаний рам тележек. Рама устанавливается на стенд в перевернутом положении и подвергается пространственному нагружению в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.1. Вертикальные реактивные силы воспринимаются опорами, установленными под рамой в местах опирания на нее кузова вагона. Горизонтальные поперечные реактивные силы воспринимаются боковыми упорами,

установленными с обеих сторон рамы напротив центральной балки. Рама тележки в ходе испытаний подвергалась нагружению силами, соответствующими максимальным эксплуатационным нагрузкам.

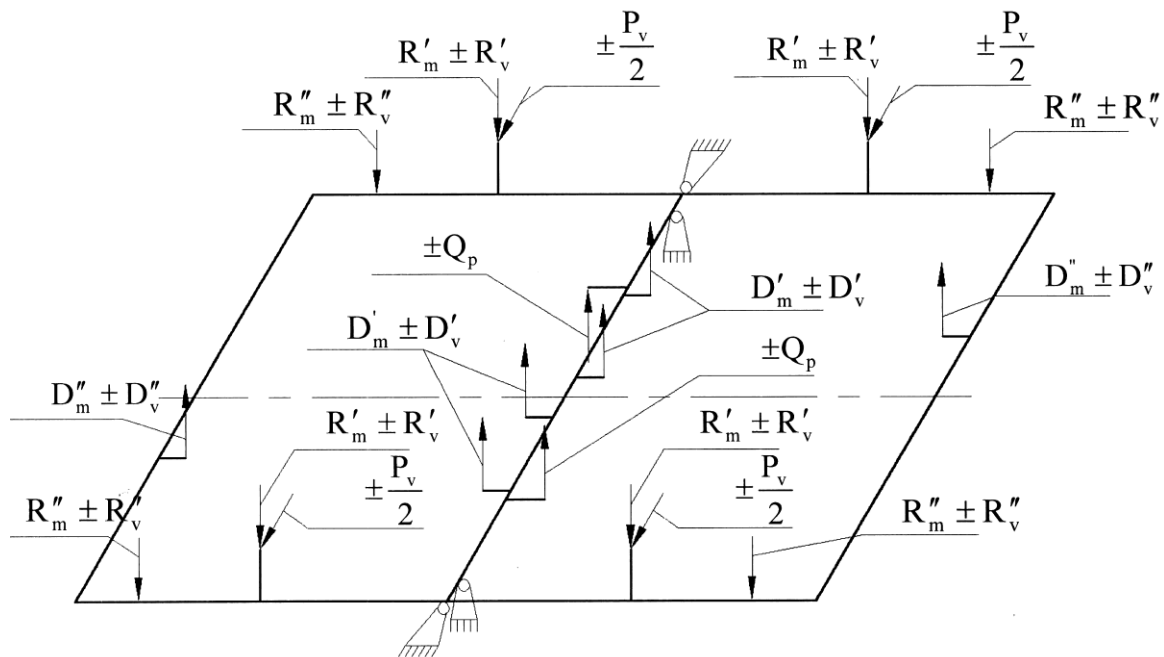


Рисунок 4.1 – Схема нагружения рамы тележки вагона модели 81-760 при стендовых испытаниях вертикальными и рамными силами

При нагружении рамы тележки реализуются следующие нагрузки:

- $R'_m = 25,68$ кН – вертикальная статическая нагрузка на кронштейн крепления рычага буксы при нагрузке вагона брутто;
- $R'_v = R'_m \cdot K_d = (\pm 6,42)$ кН – динамическая составляющая вертикальной нагрузки R'_m (K_d – коэффициент динамики, $K_d = 0,25$);
- $R''_m = 38,51$ кН – вертикальная статическая нагрузка на пружину буксового рессорного подвешивания при нагрузке вагона брутто;
- $R''_v = R''_m \cdot K_d = (\pm 9,63)$ кН – динамическая составляющая вертикальной нагрузки R''_m (коэффициент динамики $K_d = 0,25$);
- $P_v = (\pm 29,4)$ кН – горизонтальная поперечная (рамная) сила, действующая на ось;
- $T'_m = 2,45$ кН – вертикальная статическая нагрузка от массы тягового электродвигателя с муфтой, приложенная к каждому из кронштейнов крепления двигателя на центральной балке рамы тележки;

- $T'_v = (\pm 3,92)$ кН – динамическая составляющая нагрузки T'_m (коэффициент динамики $K_d = 1,6$);
- $T''_m = 3$ кН – вертикальная статическая нагрузка от массы тягового электродвигателя с муфтой, приложенная к кронштейну крепления двигателя на концевой балке рамы;
- $T''_v = (\pm 4,8)$ кН – динамическая составляющая нагрузки T''_m (коэффициент динамики $K_d = 1,6$);
- $Q_p = (\pm 29,4)$ кН – динамическая составляющая вертикальной силы в подвеске редуктора.

Конструкция стенда не позволяет нагружать узлы крепления тяговых двигателей силами T'_m , T''_m , T'_v , T''_v с приложением знакопеременной нагрузки. Поэтому к этим узлам прикладывается пульсирующая нагрузка, эквивалентная заданной. Эквивалентная нагрузка определяется из условия равенства величин коэффициентов запаса сопротивления усталости при различных нагружениях узла. Коэффициент запаса сопротивления усталости n определяется по формуле (3.1). Из условия равенства n при различных нагружениях узла имеем

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \cdot \sigma_{v1} + \psi \cdot \sigma_{m1}} = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \cdot \sigma_{v2} + \psi \cdot \sigma_{m2}} \quad (4.1)$$

Из (4.1) следует

$$K_\sigma \cdot \sigma_{v1} + \psi \cdot \sigma_{m1} = K_\sigma \cdot \sigma_{v2} + \psi \cdot \sigma_{m2} \quad (4.2)$$

С учетом пропорциональной зависимости напряжений σ , возникающих в конструкции от сил нагружения P , представим выражение (4.2) в виде

$$K_\sigma \cdot P_{v1} + \psi \cdot P_{m1} = K_\sigma \cdot P_{v2} + \psi \cdot P_{m2} \quad (4.3)$$

Определим величины сил $P_{v0} = P_{m0}$ нагружения рамы тележки пульсирующим циклом, используя полученную зависимость (4.3)

$$K_\sigma \cdot P_v + \psi \cdot P_m = (K_\sigma + \psi)P_{v0} \quad (4.4)$$

Из выражения (4.4) получаем

$$P_{v0} = \frac{K_\sigma \cdot P_v + \psi \cdot P_m}{K_\sigma + \psi} \quad (4.5)$$

Обозначив амплитуду пульсирующей нагрузки D_v и используя обозначения нагрузок, прикладываемых к раме от массы тягового двигателя, получаем

$$D_v = \frac{K_\sigma \cdot T_v + \psi \cdot T_m}{K_\sigma + \psi} \quad (4.6)$$

В соответствии с Нормами [63] для узлов крепления тяговых двигателей к раме тележки значения коэффициентов: $K_\sigma = 1,83$; $\psi = 0,3$. Подставляя исходные данные для сил T'_m , T'_v , T''_m , T''_v в выражение (4.6), получим величины сил нагружения узлов крепления тяговых двигателей пульсирующим циклом:

$$D'_m = D'_v = 3,71 \text{ кН}; D''_m = D''_v = 4,55 \text{ кН}.$$

Усталостные стендовые испытания рамы тележки включают следующие виды испытаний:

- статические испытания;
- вибрационные испытания при нагружении комплексом сил, динамические составляющие которых изменяются во времени с частотой 5 Гц.

Испытательное оборудование, средства измерения, используемые при проведении усталостных испытаний, приведены ниже:

- Стенд для испытаний рам тележек подвижного состава (инвентарный № 4700095);
- Преобразователи давления ЗОНД-10-ИД, заводские №№ 4185, 4196, 4198, 4201, 4202, 4203;
- Штангенциркуль ШЦ-II (диапазон измерений от 0 до 250 мм с ценой деления 0,1 мм), заводской № 472.

Статические испытания. Проводятся с целью определения напряженного состояния рамы при действии на нее отдельных сил или группы сил, определения наиболее напряженных мест. Рама подвергается нагружению отдельными силами или группами сил, не изменяющимися во времени. Схема нагружения показана на рисунке 4.1. Величины сил при различных режимах нагружения приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Режимы нагружения рамы тележки при статических испытаниях

№ режима	Значения сил, кН									
	Кронштейн крепления рычага буксы		Пружина буксовой ступени подвешивания		Рамная сила	Тяговый двигатель				Редуктор
	R'_m	$\pm R'_v$	R''_m	$\pm R''_v$	$\pm P_v$	D'_m	$\pm D'_v$	D''_m	$\pm D''_v$	$\pm Q_p$
1	25,68	6,42	38,51	9,63	-	-	-	-	-	-
2	25,68	6,42	38,51	9,63	-	3,71	3,71	4,55	4,55	-
3	25,68	6,42	38,51	9,63	-	3,71	3,71	4,55	4,55	29,4
4	25,68	6,42	38,51	9,63	29,4	3,71	3,71	4,55	4,55	29,4
5	25,68	-6,42	38,51	-9,63	-29,4	3,71	-3,71	4,55	-4,55	29,4

Напряженное состояние рамы тележки при нагружении определялось тензометрированием. Количество тензометрических датчиков, установленных на раму, равно 82. На рисунках 4.2 и 4.3 представлены фотографии двух узлов рамы тележки с установленными тензодатчиками.

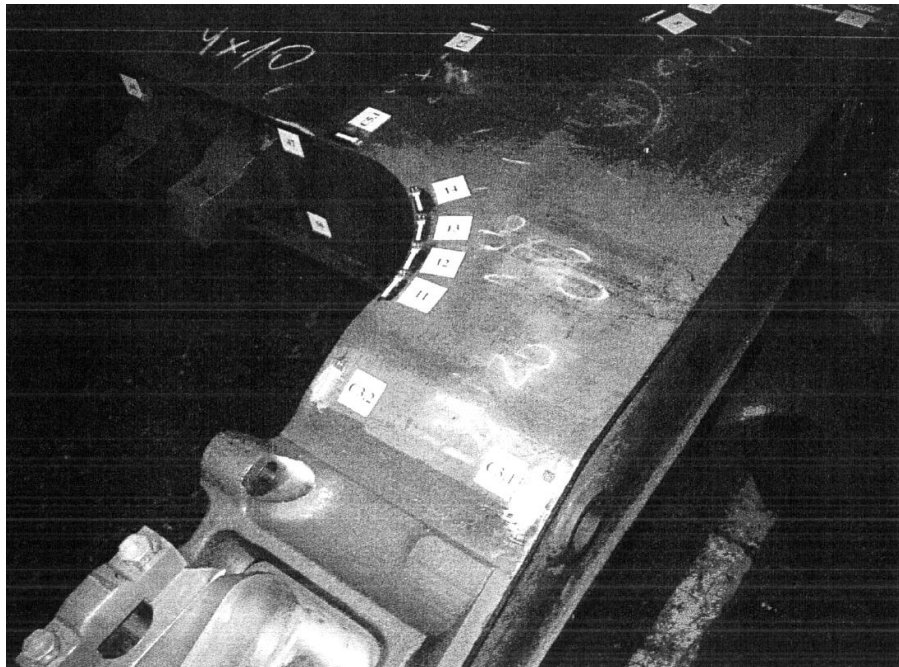


Рисунок 4.2 – Тензодатчики в зоне соединения продольной и центральной балок



Рисунок 4.3 – Тензодатчики в зоне кронштейна крепления рычага буксы

Максимальные напряжения получены в нижней части рамы в узле сопряжения продольной и центральной балок – точка замера с обозначением «21» с максимальным напряжением 131,8 МПа на режиме испытания «1» (схемы расположения тензодатчиков приведены в параграфе 4.3 на рисунках 4.11, 4.12).

Вибрационные испытания. Фотография рамы тележки на стенде ВНИИЖТ приведена на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Опытная рама тележки на стенде ВНИИЖТ

Испытания проводились с нагружением рамы комплексом сил, динамические составляющие которых изменялись во времени с частотой 5 Гц. Схема нагружения представлена на рисунке 4.1, величины сил нагружения приведены в таблице 4.2. Базовое число циклов нагружения 10^7 .

Таблица 4.2 – Режимы нагружения рамы тележки при вибрационных испытаниях

Условное обозначение силы		Значение силы, кН		Фазовый сдвиг (в градусах)
		Статическая составляющая силы	Амплитуда	
Кронштейн крепления рычага буксы	R'_m	25,68	-	0°
	R'_v	-	$\pm 6,42$	
Пружины буксовой ступени подвешивания	R''_m	38,51	-	0°
	R''_v	-	$\pm 9,63$	
Рамная сила	P_v	-	$\pm 29,4$	0°
Тяговый двигатель	D'_m	3,71	-	0°
	$\pm D'_v$	-	$\pm 3,71$	
	D''_m	4,55	-	
	$\pm D''_v$	-	$\pm 4,55$	
Редуктор	Q_p	-	$\pm 29,4$	0°

Схемы расположения тензодатчиков и результаты испытаний приведены в параграфе 4.3 соответственно на рисунках 4.11, 4.12 и в таблице 4.3. Максимальные значения напряжений $\sigma = 117,1$ МПа при высоких значениях средних напряжений растяжения цикла $\sigma_m = 77,6$ МПа зафиксированы тензодатчиком № 21, расположенным на нижнем горизонтальном листе продольной балки в зоне соединения с центральной балкой.

При проведении вибрационных испытаний поиск трещин производился два раза в сутки при работающем стенде и с использованием метода «керосиновой пробы». При появлении трещины до достижения установленной базы испытаний предусматривается ремонт, после которого испытания продолжают до достижения принятой базы испытаний с целью выявления мест рамы тележки, не имеющих требуемого сопротивления усталости.

При числе циклов нагружения $1 \cdot 10^7$ обнаружены две усталостные трещины на одном кронштейне подвешивания редуктора в зонах сварного соединения ребра кронштейна с верхней пластиной. Длина первой трещины на крон-

штейне со стороны продольной балки, составила 10 мм. Вторая трещина длиной 3 мм обнаружена с другой стороны кронштейна в аналогичном месте. На рисунках 4.5 и 4.6 приведены фотографии соответственно кронштейна редуктора (рама перевернута) с зоной возникновения усталостной трещины длиной 10 мм и фрагмента кронштейна редуктора с этой трещиной в момент ее обнаружения.

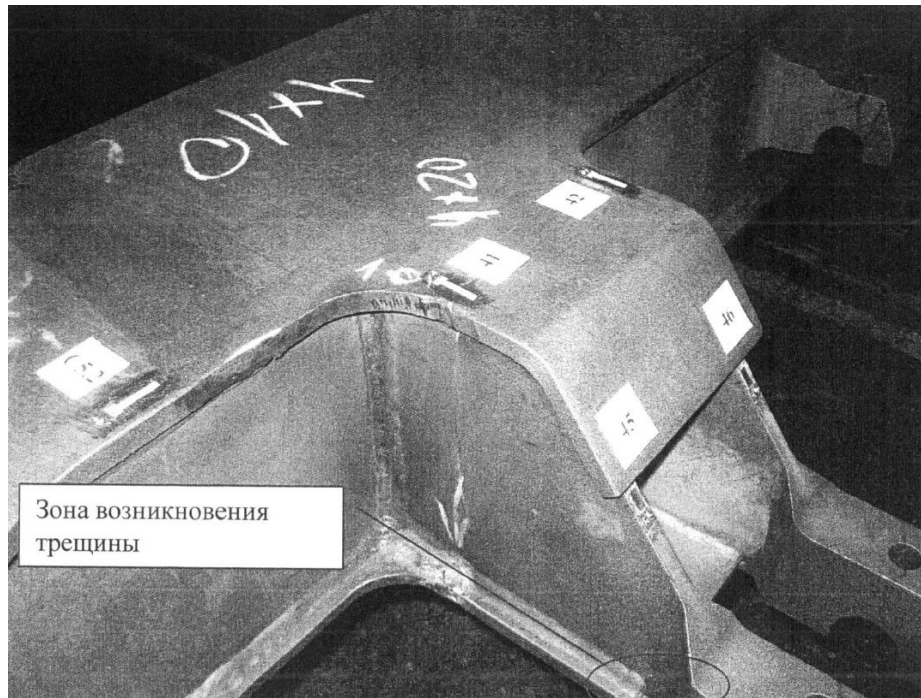


Рисунок 4.5 – Зона возникновения усталостной трещины на кронштейне редуктора (обведена овальной линией)

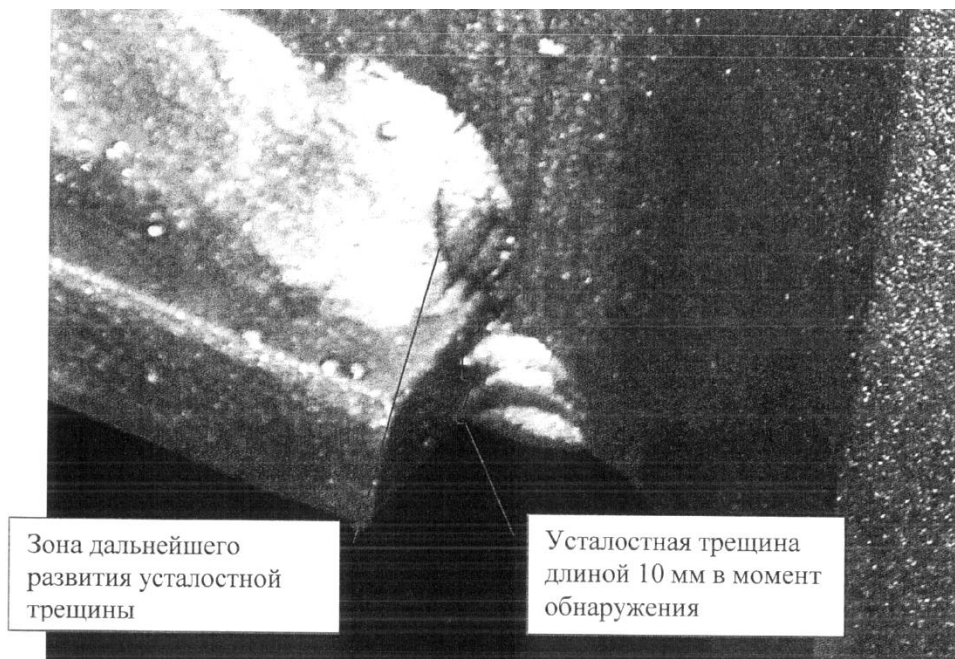


Рисунок 4.6 – Фрагмент кронштейна редуктора с усталостной трещиной

На начальном этапе испытаний (до обнаружения трещин) на вертикальных ребрах кронштейна редуктора двумя тензодатчиками зафиксированы следующие амплитуды напряжений $\sigma_v = 39,5$ МПа и $\sigma_v = 77,6$ МПа. Средние части этих тензодатчиков расположены на расстоянии 10 мм от концентратора напряжений, создаваемого сварным соединением и резким перепадом жесткостей в данном сечении. Величина теоретического концентратора напряжений α_σ в рассматриваемом сечении может составлять от 2,5 до 3,0 и выше в зависимости от технологического исполнения. Это означает, что уровень напряжений в концентраторе существенно выше замеренных датчиками.

На основании принятой методики испытаний кронштейн редуктора с выявленными трещинами был отремонтирован. Затем два кронштейна редуктора рамы тележки (второй неповрежденный кронштейн ввиду высокой вероятности возникновения аналогичных трещин) были усилены с блокированием напряженных мест накладками. Усиление проводилось так, чтобы было сохранено нагружение кронштейнов с исключением влияния выполненных ремонтных работ на результаты дальнейших испытаний рамы (за исключением кронштейнов редуктора). После выполнения этих работ испытания были продолжены до базового числа циклов нагружения.

Таким образом, вибрационные испытания опытного образца рамы тележки 7600.31.20.010.00, проведенные на базе 10^7 циклов нагружения, показали:

- рама тележки (за исключением кронштейна редуктора) соответствует требованиям «Норм» [63] по показателю «Базовое число циклов нагружения несущих элементов тележек при действии нормативных нагрузок»;

- кронштейн редуктора, являющийся узлом рамы тележки, не соответствует вышеуказанному нормативному требованию, так как при числе циклов нагружения 1 107 000 в кронштейне возникли две усталостные трещины.

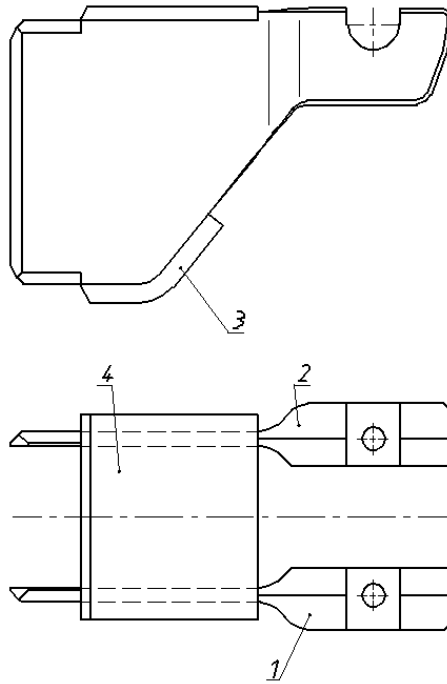
4.2 Дополнительные стендовые вибрационные испытания кронштейнов подвешивания редуктора рамы тележки

Анализ сварного кронштейна подвешивания редуктора с выявленными усталостными трещинами показывает наличие неправильного конструкторского построения узла с образованием высоких концентраторов напряжений. Был разработан новый вариант конструкции.

Проведем сравнительный анализ первого варианта с новым (рисунки 4.7 и 4.8). У нового кронштейна (рисунок 4.8) имеются следующие положительные особенности конструкции, направленные на снижение концентраторов напряжений и равномерное распределение напряжений в сечениях:

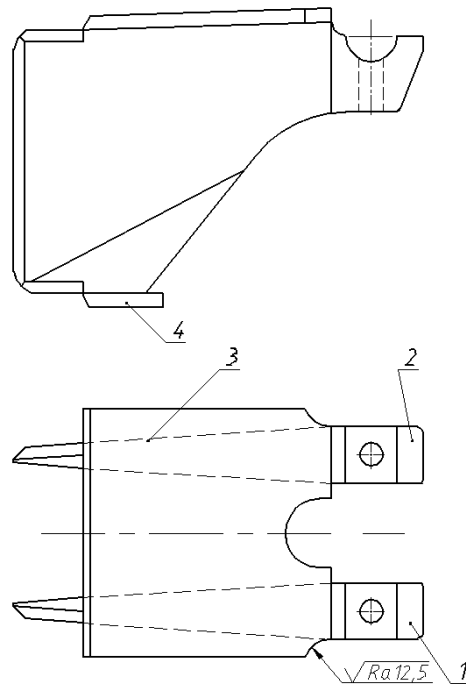
- верхняя пластина после сварки кронштейна механически обработана вместе с ребрами с выходом на радиус, что обеспечивает снятие концентратора напряжений из-за сварного соединения и резкого перепада жесткости;
- толщина ребер плавно изменяется по длине детали;
- конфигурация нижней части ребер позволяет снизить концентраторы напряжений благодаря большему радиусу сопряжения наклонной поверхности ребра с горизонтальной поверхностью концевой части кронштейна;
- снят концентратор напряжений путем исключения приварки гнутой нижней пластины к радиусному выгибу силового ребра кронштейна;
- наличие радиусного выреза на верхней пластине способствует более равномерному распределению напряжений.

Заключение о соответствии рамы тележки нормативным требованиям может быть получено после положительных результатов усталостных испытаний усиленной конструкции кронштейна редуктора. Испытания могут быть выполнены на раме тележки или на фрагменте рамы с кронштейном. Схема и режим нагружения кронштейна должны соответствовать схеме и режиму первого этапа испытаний. Испытаниям должны подвергаться два кронштейна.



1, 2 - ребра; 3 - нижняя пластина; 4 - верхняя пластина

Рисунок 4.7 – Первый вариант кронштейна подвешивания редуктора



1, 2 - ребра; 3 - верхняя пластина; 4 - нижняя пластина

Рисунок 4.8 – Новый вариант кронштейна подвешивания редуктора

Для испытаний доработанной конструкции кронштейна была изготовлена балка, соответствующая по сечениям центральной балке рамы, с двумя кронштейнами редуктора (рисунок 4.9).



Рисунок 4.9 – Образец для испытаний (с новыми кронштейнами редуктора)

Целью контрольных испытаний является проверка кронштейна редуктора требованиям Норм [63] по базовому циклу нагружений, нормативное значение которого составляет 10^7 , после прохождения испытаний объект не должен иметь усталостных повреждений.

Усталостные испытания кронштейнов подвешивания редуктора измененной конструкции проведены ВНИИЖТ в период с 2010-10-15 по 2010-11-05 [83]. Испытания проводились по типовой методике ТМ 38-02-09. Для испытаний использовалось следующее оборудование:

- Стенд для испытаний элементов рам тележек подвижного состава (инвентарный № 4700096);

- Преобразователи давления ЗОНД-10-ИД, заводские №№ 4185, 4196.

Схема нагружения кронштейна приведена на рисунке 4.10.

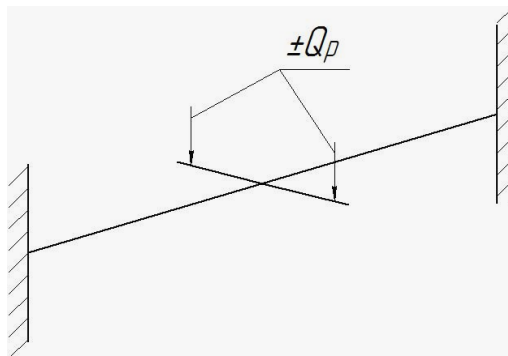


Рисунок 4.10 – Схема нагружения, реализованная при проведении усталостных испытаний кронштейна подвешивания редуктора

Величины нагрузок следующие: $Q_p = (\pm 29,4)$ кН, статическая составляющая силы отсутствует, фазовый сдвиг 0° .

Испытуемый образец к кронштейнами редуктора прошел базовое число циклов нагружения на вибрационном стенде без усталостных повреждений. Таким образом, по результатам стендовых испытаний можно сделать вывод, что разработанная конструкция рамы тележки 7600.31.20.010 с измененным кронштейном подвешивания редуктора соответствует нормативным требованиям.

4.3 Ходовые динамико-прочностные испытания опытных вагонов метрополитена с тележками, оборудованными новыми рамами

В период с 2011-08-18 по 2011-12-28 силами ОАО «ВНИИЖТ» были проведены ходовые динамико-прочностные испытания опытных вагонов метрополитена моделей 81-760, 81-761 производства ОАО «Метровагонмаш» [82].

Одна из целей испытаний состояла в проверке соответствия прочности новой рамы тележки требованиям технического задания и Норм [63]. Программа испытаний разработана на основе требований «Типовой методики сертификационных испытаний моторвагонного подвижного состава» ТМ 38-01-09 с учетом специфики эксплуатации подвижного состава метрополитена.

Работы проводились на Серпуховско-Тимирязевской и Замоскворецкой линиях Московского метрополитена. Испытанию подвергался опытный трехвагонный состав с одним испытываемым вагоном (головной вагон модели 81-760). Рама тележек этого вагона (чертежное обозначение рамы 7600.31.20.010), входящие в состав опытных тележек 7600.31.00.002, были оборудованы тензодатчиками. Тензометрированию подвергались 106 точек рамы тележки. На рисунках 4.11 и 4.12 показаны схемы расположения некоторых, наиболее важных точек замера, в которых выполнялось тензометрирование.

Число поездок опытного состава в ходе испытаний составило: четырнадцать, из них девять поездок с испытываемым вагоном в порожнем состоянии и пять поездок в груженном состоянии. Одна из поездок в груженном состоянии

проводилась при максимальной загрузке вагона (10 чел./м²), остальные четыре поездки при загрузке пассажирами 8 чел./м². Посадка пассажиров не производилась, требуемая масса брутто обеспечена загрузкой балласта.

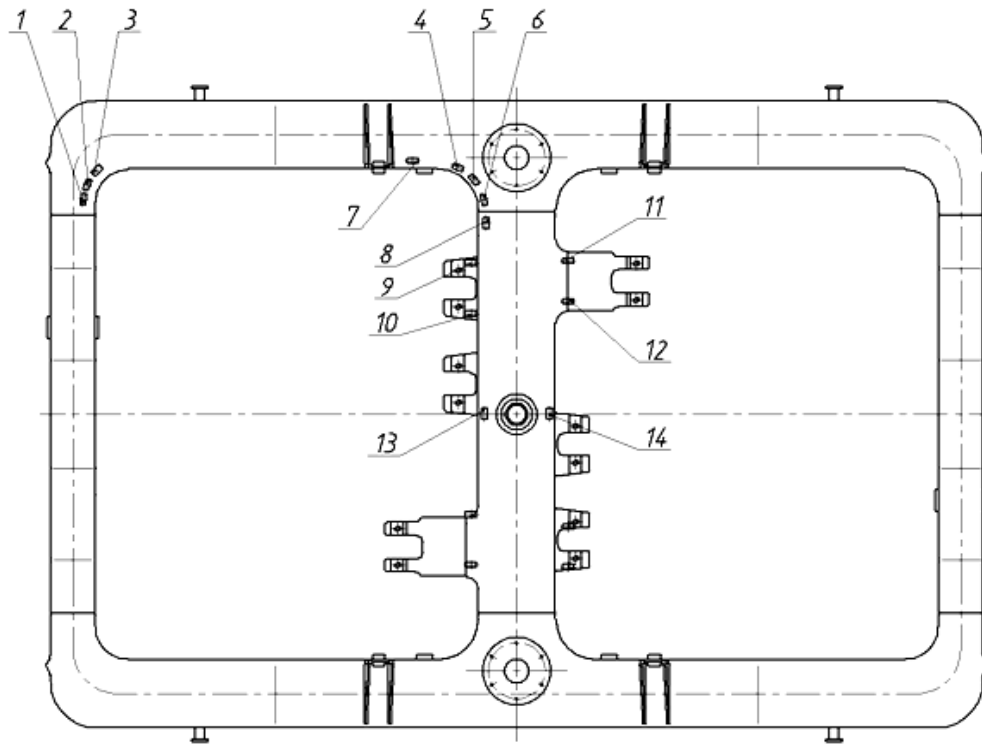


Рисунок 4.11 – Схема расположения части тензометрических датчиков при проведении испытаний рамы тележки (вид рамы тележки сверху)

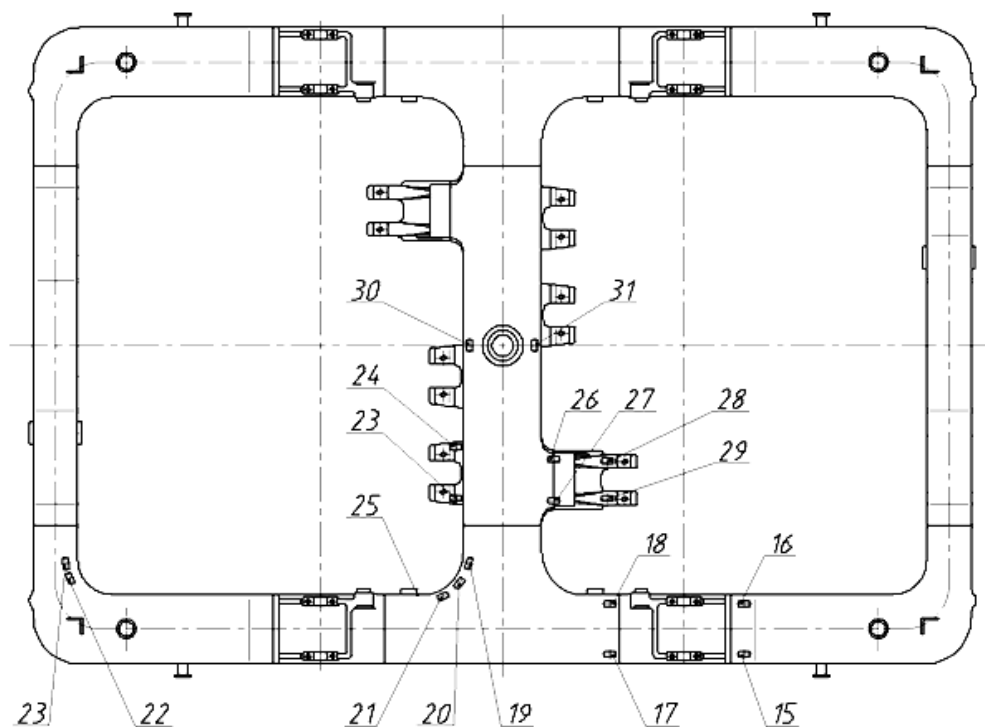


Рисунок 4.12 – Схема расположения части тензометрических датчиков при проведении испытаний рамы тележки (вид рамы тележки снизу)

В таблице 4.3 приведены величины максимальных напряжений, полученных при расчете рамы тележки, стендовых и динамических ходовых испытаниях.

Таблица 4.3 – Результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований новой рамы тележки

Номер точки замера	Величины максимальных напряжений, МПа		
	Результаты расчета (эквивалентные напряжения)	Стендовые вибрационные испытания	Ходовые динамико-прочностные испытания
1	25,3	4,5	24,3
2	26,7	1,3	24,1
3	16,3	4,5	16,5
4	78,0	-79,2	-34,6
5	50,0	-62,5	-22,7
6	38,0	-22,2	-
7	67,0	-61,7	-
8	25,0	0,5	16,1
9	30,0	23,8	28,2
10	33,4	31,4	27,7
11	23,0	7,3	26,2
12	20,0	19,2	23,1
13	16,2	-1,8	-
14	18,3	-8,3	-
15	55,0	48,5	20,4
16	65,0	61,4	28,2
17	39,0	34,0	11,7
18	62,0	57,5	38,6
19	89,0	87,6	26,3
20	120,0	102,3	-
21	152,0	117,1	32,7
22	18,0	11,9	20,0
23	6,0	2,9	9,6
24	14,0	-15,4	-
25	175,0	-	-32,8
26	16,0	8,0	15,9
27	28,6	-	24,7
28	31,0	29,1	15,7
29	33,9	31,7	17,2
30	16,0	7,6	-
31	18,5	10,0	-

Анализ результатов расчета, стендовых и ходовых испытаний новой рамы тележки, представленных в таблице 4.3, позволяет сделать следующие выводы:

1 Теоретические и экспериментальные исследования показывают отсутствие у новой конструкции рамы тележки напряжений, превышающих допускаемые $[\sigma] = 180$ МПа.

2 Для большинства точек (более 70 %) тензометрических замеров погрешность результатов напряжений, полученных при математическом моделировании по сравнению с экспериментальными данными не превышает 15 %. Это говорит об адекватности разработанной в главе 3 настоящей работы математической модели рамы тележки новой конструкции.

3 Для некоторых точек замеров (менее 30 % от общего количества замеров) погрешность результатов напряжений, полученных при математическом моделировании по сравнению с экспериментальными данными, составляет более 15 %. Однако это не противоречит сделанному выше выводу об адекватности математической модели по следующим причинам:

- Математическое моделирование и расчет производились с учетом наиболее неблагоприятного сочетания режимов нагружения с максимальными величинами нагрузок. Выполнить 100%-ную имитацию сочетания таких нагрузок при экспериментальных работах невозможно;

- Величины напряжений в некоторых точках замеров, заявленных в таблице 4.3, не совпадают по причине технологии производства экспериментальных работ с тензометрированием. Так, например, точка замера № 25 с максимальным эквивалентным напряжением 175 МПа, полученным при расчете, определена в зоне сварного шва (рисунок 3.27). Установка тензодатчика при испытаниях фактически произведена несколько ниже, то есть в зоне более низких действующих напряжений.

Таким образом, можно считать научно доказанным, что заявленная конструкция рамы тележки перспективного вагона, предназначенного для современных столичных мегаполисов России, обладает требуемыми прочностными характеристиками и может быть допущена к производству и эксплуатации.

ГЛАВА 5 РАСЧЕТ ПОЛЕЗНОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВАГОНОВ И ТЕЛЕЖЕК С НОВЫМИ РАМАМИ

5.1 Методика расчета и определение исходных данных

До распада СССР в Министерстве тяжелого и транспортного машиностроения действовали и периодически пересматривались методические указания по определению экономической эффективности новой техники. Расчеты по тематике вагонов метрополитена согласовывались с ВНИИВ и Главным управлением метрополитенов Министерства путей сообщения. В настоящий момент данных ведомств не существуют, машиностроительные предприятия и метрополитены, находящиеся в ведении городских администраций, самостоятельны. Также не существует единой методики расчета. Поэтому принимается решение разработать методику технико-экономических расчетов подвижного состава метрополитенов. Далее приведен выполненный на основе разработанной методики [56] расчет полезного экономического эффекта от внедрения вагонов моделей 81-760/761, оборудованных рамами тележек новой конструкции.

Методика расчета учитывает:

- специфику конструкции и эксплуатации вагонов метрополитена, экономическую ситуацию в стране, современный уровень экономической науки;
- методику и опыт аналогичных расчетов, применяемых на Российских железных дорогах, в частности методику [57].

В качестве базовой техники взяты вагоны моделей 81-740.4/741.4 («Русич»). Данное решение обусловлено следующими соображениями:

- вагоны «Русич» наиболее близки по конструкции тележек вагонам нового проектирования (возможность получения меньшей погрешности при прогнозировании и эксплуатационных затрат);
- эти вагоны продолжают производиться, что дает возможность получения исходных данных для расчета по состоянию на сегодняшний день.

В расчете учитывается составность электропоездов. Состав (поезд) базовых вагонов состоит из пяти вагонов (двух головных 81-740.4 и трех промежуточных 81-741.4). Каждый вагон этих моделей состоит из двух сочлененных кузовов. Состав новых вагонов состоит из восьми вагонов (двух головных 81-760 и шести промежуточных 81-761). Характеристики вагонов и их составов приведены в таблицах 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 – Техничко-экономические характеристики вагонов

Показатель	Базовые вагоны		Новые вагоны	
	81-740.4	81-741.4	81-760	81-761
Масса тары вагона, т	47	46	36	35
Масса брутто вагона, т	71,7	72,2	57,4	58,1
Эксплуатационная скорость, км/ч	42	42	48	48
Максимальная/номинальная вместимость вагона, чел.	353/200	382/212	306/199	330/215
Удельная мощность привода, кВт/т	14,2	14,2	18,8	18,8
Удельный расход электроэнергии, кВт•ч/тыс.т•км	40,7	40,7	43,5	43,5
Срок службы вагона нормативный, лет	31	31	35	35
Оптовая цена вагона, тыс. руб.	67 900	60 500	70 000	55 000
Расчетная усредненная цена одной тележки, тыс. руб.	3 900	3 900	5 000	5 000

Таблица 5.2 – Техничко-экономические характеристики составов

Показатель	Один состав базовых вагонов	Один состав новых вагонов
Максимальная масса состава, т	$2 \cdot 71,7 + 3 \cdot 72,2 = 360$	$2 \cdot 57,4 + 6 \cdot 58,1 = 463,4$
Максимальная вместимость состава, чел.	$2 \cdot 353 + 3 \cdot 382 = 1852$	$2 \cdot 306 + 6 \cdot 330 = 2592$
Номинальная вместимость состава, чел.	$2 \cdot 200 + 3 \cdot 212 = 1036$	$2 \cdot 199 + 6 \cdot 215 = 1688$
Оптовая цена состава, тыс. руб.	$2 \cdot 67900 + 3 \cdot 60500 = 317\ 300$	$2 \cdot 70000 + 6 \cdot 55000 = 470\ 000$

В расчете учтены данные Московского метрополитена. В таблице 5.3 приведены эксплуатационные показатели, необходимые для расчета.

Таблица 5.3 – Показатели работы Московского метрополитена

Показатель	Базовые вагоны	Новые вагоны
Кол-во дней работы одного вагона в течение года	274	310
Коэффициент использования парка (отношение эксплуатируемого парка к инвентарному)	0,75	0,85
Средняя продолжительность работы вагона на линии в течение суток, ч	14	14
Средняя дальность поездки пассажира, км	13,0	13,0
Стоимость пассажиро-часа (ориентировочная), руб.	67	67
Отношение общего пробега вагонов к их пробегу с пассажирами	1,0443	1,0443
Средняя загрузка состава, чел.		
в часы пик	965	1544
в прочие часы	265	424

Изменения коэффициента использования парка и количества дней работы новых вагонов в течение года обусловлены увеличением межремонтных пробегов по всем видам технического обслуживания и ремонта. В таблицах 5.4 и 5.5 приведены стоимости плановых технических обслуживаний (ТО) и ремонтов соответственно базового и нового вагонов в рамках жизненного цикла.

Таблица 5.4 – Расчет стоимости плановых технических обслуживаний и ремонтов одного базового вагона за период жизненного цикла

Вид ТО или ремонта	Кол-во ТО и ремонтов за жизненный цикл	Средняя стоимость одного ТО или ремонта, тыс. руб.	Общая стоимость за жизненный цикл, тыс. руб.
ТО-0	11 315	0,15	1 697,3
ТО-1	5 757	2,3	13 241,1
ТО-2	1 163	12,7	14 770,1
ТО-3	582	44,8	26 073,6
ТО-4	36	25,5	918,0
Текущий ремонт ТР-1	72	70	5 040,0
Текущий ремонт ТР-2	19	392,6	7 459,4
Текущий ремонт ТР-3	10	3 161,4	31 614,0
СР (средний ремонт)	4	6 334,8	25 339,2
КР (капитальный ремонт)	1	15 837	15 837
Всего			141 989,7

Таблица 5.5 – Расчет стоимости плановых технических обслуживаний и ремонтов одного нового вагона за период жизненного цикла

Вид ТО или ремонта	Кол-во ТО и ремонтов за жизненный цикл	Средняя стоимость одного ТО или ремонта, тыс. руб.	Общая стоимость за жизненный цикл, тыс. руб.
ЭО (эксплуатационное обслуживание)	11 656	0,4	4 662,4
ТО	146	79,3	11 577,8
ПР-1 (периодический ремонт первого объема)	37	70	2 590
ПР-2 (периодический ремонт второго объема)	16	392,6	6 281,6
Обточка колесных пар	28	6,4	179,2
ПДР-1 (подъемочный деповской объем первого объема)	8	2 850,7	22 805,6
ПДР-2 (подъемочный деповской объем второго объема)	2	5 701,3	11 402,6
ЗР (заводской ремонт)	2	15 045,2	30 090,4
Всего			89 589,6

5.2 Расчет стоимости жизненного цикла

Стоимость жизненного цикла СЖЦ (LCC – Life Cycle Cost) подвижного состава и других сложных технических систем определяется по формуле

$$СЖЦ(LCC) = C_{np} + \sum_{t=1}^T (I_t + \Delta K_t - L_t) \cdot \alpha_t, \quad (5.1)$$

где C_{np} – цена приобретения объекта (первоначальная стоимость), тыс. руб.; I_t – годовые эксплуатационные расходы, тыс. руб.; ΔK_t – сопутствующие единовременные затраты, связанные с внедрением техники в эксплуатацию, тыс. руб.; L_t – ликвидационная стоимость объекта, тыс. руб.; α_t – коэффициент дисконтирования; t, T – соответственно текущий и конечный годы эксплуатации.

Определение стоимости жизненного цикла одного пятивагонного состава (электропоезда) базовых вагонов начнем с определения величин, входящих в формулу (5.1).

а) За цену приобретения C_{np} принимаем оптовые цены, приведенные в таблицах 5.1 и 5.2: для головного вагона $C_{np}^{740.4} = 67\,900$ тыс. руб.; промежуточного вагона $C_{np}^{741.4} = 60\,500$ тыс. руб., состава $C_{np.баз.состав} = 317\,300$ тыс. руб.

б) Годовые эксплуатационные расходы I_t будем определять, исходя из затрат на электроэнергию; оплату эксплуатационного персонала; техническое обслуживание, текущие и капитальные ремонты.

Годовые затраты на электроэнергию определим по формуле

$$I_{эл} = P \cdot \mathcal{E}_{уд} \cdot C_{\mathcal{E}}, \quad (5.2)$$

где P – годовой объем перевозочной работы вагона или состава, тыс. т•км; $\mathcal{E}_{уд}$ – удельный расход электроэнергии, кВт•ч/тыс.т•км; $C_{\mathcal{E}}$ – стоимость 1 кВт•ч, принимаем $C_{\mathcal{E}} = 2,6$ руб.

Годовой объем перевозочной работы в тонно-километрах (грузооборот) вагона определим по формуле

$$P = (L_{год} \cdot M_{тара} + \Pi \cdot m) k_{ин.}, \quad (5.3)$$

где $L_{год}$ – годовой пробег вагона, тыс. км; $M_{тара}$ – масса тары вагона, т; Π – годовой объем перевозочной работы вагона в пассажиро-километрах (пассажирооборот), тыс. пасс.-км; m – средняя масса пассажира, $m = 0,07$ т; $k_{ин.}$ – коэффициент инерции вращающихся частей вагона, $k_{ин.} = 1,1$.

Годовой объем перевозочной работы вагона в пассажиро-километрах определим по формуле

$$\Pi = n \left(\Pi_{сутки}^{пик} + \Pi_{сутки}^{пр.часы} \right), \quad (5.4)$$

где n – количество дней работы вагона в течение года.; $\Pi_{сутки}^{пик}$, $\Pi_{сутки}^{пр.часы}$ – суточные пассажирообороты соответственно, приходящиеся на время работы в течение суток в час пик и прочие часы.

Среднесуточный пробег вагона составит $42 \cdot 14 = 588$ км. Будем считать, что на среднее время работы вагона на линии 14 ч на работу в час пик приходится 2 ч. Пробег в час пик составит 84 км, в другие часы суточного пробега 504 км.

Тогда годовой пробег базового вагона:

$L_{год.} = 588 \cdot 274 \cdot 1,0443 = 168,249$ тыс. км, где 1,0443 – отношение общего пробега вагонов к их пробегу с пассажирами.

Объем перевозочной работы в сутки в час пик:

$P_{сутки}^{пик} = 193 \cdot 84 = 16,212$ тыс. пас.-км, где 193 человек – средняя наполняемость вагона в час пик.

В прочие часы суток объем перевозочной работы:

$P_{сутки}^{пр.часы} = 53 \cdot 504 = 26,712$ тыс. пасс.-км, где 53 человека – средняя наполняемость вагона в прочие часы.

Определяем по формуле (5.4) годовой пассажирооборот базового вагона $P = (16\ 212 + 26\ 712) \cdot 274 = 11\ 761,176$ тыс. пасс.-км. Для состава эта величина составит 58 805,88 тыс. пасс.-км.

Теперь определяем по формуле (5.3) годовой объем перевозочной работы базовых вагонов P :

Для головного вагона $P^{740.4} = (168\ 249 \cdot 47 + 11\ 761\ 176 \cdot 0,07) \cdot 1,1 = 9\ 604,083$ тыс. т•км;

Для промежуточного вагона $P^{741.4} = (168\ 249 \cdot 46 + 11\ 761\ 176 \cdot 0,07) \cdot 1,1 = 9\ 419,009$ тыс. т•км.

Определяем годовой грузооборот базового состава:

$$P_{сост.} = 2 \cdot 9\ 604\ 083 + 3 \cdot 9\ 419\ 009 = 47\ 465,193 \text{ тыс. т•км.}$$

Затем по формуле 5.2 определяем годовые затраты на электроэнергию:

для головного вагона $I_{эл.}^{740.4} = 9\ 604,083 \cdot 40,7 \cdot 2,6 = 1\ 016,304$ тыс. руб.;

для промежуточного вагона $I_{эл.}^{741.4} = 9\ 419,009 \cdot 40,7 \cdot 2,6 = 996,719$ тыс. руб.;

для состава $I_{эл.} = 47\ 465,193 \cdot 40,7 \cdot 2,6 = 5\ 022,766$ тыс. руб.

Оплату эксплуатационного персонала учтем по годовой оплате труда машинистов одного состава: $272,2 \cdot 14 \cdot 274 \cdot 1,13 = 1\ 179\ 900$ руб., где 272,2 руб./ч – средняя заработная плата машиниста в час; 14 ч – среднее время работы состава на линии; 274 – количество дней работы состава за год; 1,13 – коэффициент, учитывающий отчисления на налог с дохода.

Используя данные таблицы 5.4 определим среднегодовую стоимость плановых ТО и текущих ремонтов. Для этого разделим суммарную стоимость всех плановых работ на срок службы: $141\,989\,700 : 31 = 4\,580,312$ тыс. руб. Тогда для одного состава средняя стоимость плановых ТО и ремонтов составит:

$$4\,580,312 \cdot 5 = 22\,901,560 \text{ тыс. руб.}$$

Определяем годовые эксплуатационные расходы на один электропоезд базовых вагонов, суммируя годовые затраты на электроэнергию, оплату эксплуатационного персонала, среднегодовую стоимость плановых ТО и ремонтов:

$$I_t^{\text{состав}} = 5\,022\,766 + 1\,179\,900 + 22\,901\,560 = 29\,104,226 \text{ тыс. руб.}$$

в) Сопутствующие единовременные расходы для базовых вагонов, произведенные в 2002-2004 годах, приблизительно составили 800 000 тыс. руб. Расходы были связаны с оборудованием электродепо «Варшавское» под новый подвижной состав и на обучение персонала. Тогда для имеющегося сейчас базового парка свыше 500 вагонов (на начало 2011 года), доля этих расходов, приходящаяся на один вагон, примерно 1 600 тыс. руб., а на один состав 8 000 тыс. руб.

г) Согласно методике [56] ликвидационная стоимость L_t , рассчитываемая на конечной стадии эксплуатации подвижного состава по истечении 20-40 лет (в нашем случае более 30 лет), с учетом дисконтирования, является малой величиной и при определении СЖЦ может не учитываться.

д) С целью приведения разновременных затрат на определенный момент времени выполняется дисконтирование. Норму дисконта E (ставку дисконтирования) принимаем, исходя из уровня средней ставки процента по долгосрочным кредитам банков (10 %).

е) По формуле (5.1) определяем стоимость жизненного цикла одного базового состава (электропоезда). Коэффициенты дисконтирования определяем по таблице Д1 Приложения Д [56] при норме дисконта $E = 10$.

Расчетом получена следующая величина стоимости жизненного цикла базового электропоезда:

$$СЖЦ = 317300000 + \sum_{t=1}^{T=31} (29104226 + 8000000) \cdot \alpha_t = 669011 \text{ тыс. руб.}$$

Расчет стоимости жизненного цикла одного восьмивагонного состава (электропоезда) новых вагонов выполним по такой же методике.

а) Оптовые цены новых вагонов и состава приведены в таблицах 5.1 и 5.2:

$$C_{np}^{760} = 70\,000 \text{ тыс. руб.}; C_{np}^{761} = 55\,000 \text{ тыс. руб.}; C_{np}^{\text{нов.состав}} = 470\,000 \text{ тыс. руб.}$$

б) Определим годовые эксплуатационные расходы I_t , исходя из затрат на электроэнергию; оплату эксплуатационного персонала; техническое обслуживание, текущие, капитальные ремонты.

Годовые затраты на электроэнергию определим по формуле (5.2).

Сначала рассчитываем годовой объем перевозочной работы (грузооборот) вагона по формуле (5.3).

Среднесуточный пробег вагона составит $48 \cdot 14 = 672$ км. Считаем, что на среднесуточное время работы 14 ч приходится 2 ч на работу в час пик. Пробег в час пик составит 96 км, в другие часы суточного пробега 576 км. Годовой пробег нового вагона $L_{год} = 672 \cdot 310 \cdot 1,0443 = 217,548$ тыс. км, где 1,0443 – отношение общего пробега вагонов к их пробегу с пассажирами.

Объем перевозочной работы в сутки в час пик:

$$193 \cdot 96 = 18,528 \text{ тыс. пасс.-км, где } 193 \text{ человек – средняя наполняемость вагона в час пик. В прочие часы суток } 53 \cdot 576 = 30,528 \text{ тыс. пасс.-км.}$$

Тогда годовой объем перевозочной работы (пассажирооборот) нового вагона согласно формуле (5.4): $\Pi = (18\,528 + 30\,528) \cdot 310 = 15\,207,36$ тыс. пасс.-км. Для состава эта величина составит 121 658,88 тыс. пасс.-км.

Теперь определяем годовой грузооборот новых вагонов:

$$\text{Для головного вагона } P^{760} = (217\,548 \cdot 36 + 15\,207\,360 \cdot 0,07) \cdot 1,1 = \\ = 9\,785,867 \text{ тыс. т} \cdot \text{км};$$

$$\text{Для промежуточного вагона } P^{761} = (217\,548 \cdot 35 + 15\,207\,360 \cdot 0,07) \cdot 1,1 = \\ = 9\,546,564 \text{ тыс. т} \cdot \text{км.}$$

Тогда годовой грузооборот нового состава:

$$P_{сост.} = 2 \cdot 9\,785\,867 + 6 \cdot 9\,546\,564 = 76\,851,118 \text{ тыс. т} \cdot \text{км.}$$

По формуле (5.2) определяем годовые затраты на электроэнергию:

для головного вагона $I_{эл.}^{760} = 9\,785,867 \cdot 43,5 \cdot 2,6 = 1\,106,781$ тыс. руб.;

для промежуточного вагона $I_{эл.}^{761} = 9\,546,564 \cdot 43,5 \cdot 2,6 = 1\,079,716$ тыс. руб.;

для состава $I_{эл.} = 76\,851,118 \cdot 43,5 \cdot 2,6 = 8\,691,861$ тыс. руб.

Оплату эксплуатационного персонала определим по годовой оплате машинистов одного состава: $272,2 \cdot 14 \cdot 310 \cdot 1,13 = 1\,334\,923$ руб., где 272,2 руб./ч – средняя заработная плата машиниста в час; 14 ч – среднее время работы состава на линии; 310 – количество дней работы состава за год; 1,13 – коэффициент, учитывающий отчисления на налог с дохода.

Определяем среднегодовую стоимость плановых ТО и ремонтов. Для этого разделим суммарную стоимость всех плановых ТО и ремонтов для одного вагона (таблица 5.5) на срок службы: $89\,589\,600 : 35 = 2\,559,702$ тыс. руб.

Тогда для одного состава средняя стоимость плановых ТО и ремонтов составит $2\,559,702 \cdot 8 = 20\,477,616$ тыс. руб.

Определяем годовые эксплуатационные расходы на один электропоезд новых вагонов, суммируя годовые затраты на электроэнергию, оплату эксплуатационного персонала, стоимость плановых ТО и ремонтов:

$$I_t^{состав} = 8\,691\,861 + 1\,334\,923 + 20\,477\,616 = 30\,504,400 \text{ тыс. руб.}$$

в) Сопутствующие единовременные расходы для новых вагонов ΔK_t определим из следующей суммы расходов:

1) На реконструкцию электродепо Мосметрополитена «Новогиреево», которое будет осваивать новую технику, выделено 1 500 000 тыс. руб. Примерно 2/3 этих средств запланированы на новое строительство в связи с увеличением парка вагонов, капитальный ремонт имеющихся площадей и так далее. Таким образом, эту часть затрат принимаем равной 500 000 тыс. руб.

2) Для обучения машинистов электропоездов организованы пятидневные курсы (для штатных машинистов). Учтем затраты на обучение 30 человек. В дальнейшем это будет плановое обучение по специальности «машинист электропоезда». Учитывая сохранение средней заработной платы в течение обучения, расходы составят: $30 \cdot 5 \cdot 8 \cdot 272,2 = 326,640$ тыс. руб.

Тогда $\Delta K_i = 500\,000\,000 + 326\,640 = 500\,326,640$ тыс. руб.

Так как эти единовременные расходы отнесены ко всему будущему парку новых вагонов, который будет не менее 500, определим долю этих расходов, приходящихся на один вагон: $500\,326,640 : 500 = 1\,000,653$ тыс. руб.

Тогда на один состав сопутствующие единовременные расходы будут $1\,000,653 \cdot 8 = 8\,005,224$ тыс. руб.

г) С учетом вводимого срока службы в 35 лет, по формуле (5.1) определяем стоимость жизненного цикла одного состава новых вагонов. Коэффициенты дисконтирования определяем по таблице Д1 Приложения Д [56] при норме дисконта $E = 10$.

Расчетом получено:

$$СЖЦ = 470000000 + \sum_{t=1}^{T=35} (30504400 + 8005224) \cdot \alpha_t = 841392 \text{ тыс. руб.}$$

Полученные экономические показатели приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Основные экономические показатели базовых и новых электропоездов

Показатель	Базовый электропоезд	Новый электропоезд
Годовые эксплуатационные расходы, тыс. руб.	29 104	30 504
Стоимость жизненного цикла, тыс. руб.	669 011	841 392

5.3 Расчет экономического эффекта

Полезный эффект нового подвижного состава при эксплуатации представляет стоимостную оценку изменения их потребительских свойств по сравнению с базовой техникой, оказывающих влияние на показатели производительности, надежности и долговечности, использования рабочей силы, сырья, материалов, качество перевозочного процесса.

Определим полезный эффект от внедрения нового электропоезда:

$$\mathcal{E}_n = C_{\delta} \cdot (K_{II} \cdot K_D - 1) + \Delta LCC' + \mathcal{E}_K, \quad (5.5)$$

где C_{δ} – цена одного базового электропоезда, $C_{\delta} = 317\,300$ тыс. руб.;

K_n – коэффициент учета роста производительности нового электропоезда по сравнению с базовым;

K_d – коэффициент учета изменения срока службы нового подвижного состава по сравнению с базовым;

$\Delta LCC'$ – экономия СЖЦ при использовании новой техники по сравнению с базовой;

\mathcal{E}_k – эффект от изменения качества перевозок.

Определим коэффициент учета роста производительности нового электропоезда по сравнению с базовым по формуле

$$K_n = \frac{B_n}{B_o}, \quad (5.6)$$

где B_n и B_o – годовые объемы работы, выполняемые соответственно новым и базовым составами. Используем годовые пассажирообороты.

Тогда $K_n = 121\,658,88 / 58\,805,88 = 2,068$.

Коэффициент учета изменения срока службы нового подвижного состава по сравнению с базовым определяем по формуле

$$K_d = \frac{\frac{1}{T_o} + E}{\frac{1}{T_n} + E}, \quad (5.7)$$

где T_o , T_n – сроки службы соответственно базовой и новой техники.

$$K_d = \frac{\frac{1}{31} + 10}{\frac{1}{35} + 10} = 1,00037$$

Экономия СЖЦ при использовании новой техники по сравнению с базовой выполняется без учета прямых инвестиций в приобретение техники и амортизационных отчислений в составе годовых эксплуатационных расходов. Определение этого показателя произведем по изменению годовых эксплуатационных расходов потребителя для одного состава на расчетный период, равный сроку службы базового состава. Изменение сопутствующих капитальных вложений потребителя при использовании нового состава взамен базового учитывать не будем.

Экономия СЖЦ определим по формуле:

$$\Delta LCC' = \sum_{t=1}^T \Delta M'_t \cdot \alpha_t, \quad (5.8)$$

где $\Delta M'_t$ – изменение годовых эксплуатационных расходов потребителя при использовании нового электропоезда.

Коэффициенты дисконтирования α_t определяем по таблице Д1 Приложения Д [56] при норме дисконта $E = 10$.

$$\Delta LCC' = \sum_{t=1}^{T=31} (29104 - 30504) \alpha_t = -13270,3 \text{ тыс. руб.}$$

Определим эффект \mathcal{E}_K от изменения качества перевозок за счет увеличения эксплуатационной скорости движения.

$$\mathcal{E}_K = p \cdot \frac{P_n}{l} \left(\frac{l}{v_{\delta}} - \frac{l}{v_n} \right), \quad (5.9)$$

где p – стоимость пассажиро-часа, руб.;

P_n – годовой пассажирооборот нового состава, пасс.-км;

l – средняя дальность поездки пассажира, км;

v_{δ} , v_n – эксплуатационная скорость соответственно базового и нового электропоезда, км/ч.

$$\mathcal{E}_K = 67 \cdot \frac{121658880}{13} \left(\frac{13}{42} - \frac{13}{48} \right) = 24259,374 \text{ тыс. руб.}$$

Теперь определим полезный эффект электропоезда по формуле (5.5):

$$\mathcal{E}_n = 317\,300\,000 \cdot (2,068 \cdot 1,00037 - 1) - 13\,270\,300 + 24\,259\,374 = 350\,108 \text{ тыс. руб.}$$

Тогда годовой полезный эффект от внедрения нового электропоезда составит $350\,108\,000 / 31 = 11\,293,8$ тыс. руб.

Полезный эффект от внедрения и эксплуатации комплекта тележек определим через долю стоимости тележек в составе одного электропоезда:

$$\mathcal{E}_{\text{тел.}} = 350108000 \cdot \frac{5000000 \cdot 16}{470000000} = 59592,8 \text{ тыс. руб.}$$

Таким образом, выполненный расчет показал наличие полезного эффекта от внедрения одного электропоезда с вагонами моделей 81-760/761:

- на расчетный период в 31 год более 350 млн руб.;

- за один год более 11 млн руб.

Полезный эффект от внедрения комплекта тележек с новыми рамами для одного электропоезда (16 тележек) составит:

- на расчетный период в 31 год более 59 млн руб.;

- за один год более 1,9 млн руб.

В заключение данной главы приведем характеристики нового подвижного состава, которые привели к появлению полезного эффекта:

1 Увеличение срока службы до 35 лет (у базовых вагонов срок службы определен в 31 год);

2 Увеличение производительности: годовой пассажирооборот электропоезда новой конструкции составляет согласно расчету 121 658,88 тыс. пасс.-км, а у базового электропоезда 58 805,88 тыс. пасс.-км. Это достигается за счет большей пассажироместимости нового поезда, возможности увеличения эксплуатационной скорости движения за счет увеличения удельной мощности привода, большего количества дней работы поезда в течение года за счет увеличения межремонтных пробегов;

3 Уменьшение стоимости плановых технических обслуживаний и ремонтов вагона новой модели за период жизненного цикла за счет увеличения межремонтных пробегов и уменьшения количества плановых обслуживаний и ремонтов по сравнению с базовым вагоном (таблицы 5.4 и 5.5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Основные результаты (итоги) диссертационной работы приведены ниже:

1 Выполнен комплекс исследований конструкций рам тележек вагонов отечественных метрополитенов, связанных с прочностным и надежностным анализом их эволюции развития. Разработана концепция дальнейшего развития узла.

2 Построены статистические модели и определены показатели надежности рам тележек вагонов метро старых серий Московского метрополитена.

3 Исследованы особенности эксплуатации рам тележек на различных метрополитенах России.

4 Разработана математическая (конечно-элементная) модель рамы тележки с учетом оптимизации сечений балок в соответствии с действующими нагрузками. Проведено теоретическое исследование, показавшее соответствие математической модели действующим Нормам [63].

5 Научно обоснованы и разработаны концепция проектирования и основные технические решения рамы тележки для перспективных вагонов метрополитена.

6 Изготовлены опытные образцы рам тележек и проведены стендовые усталостные испытания, показавшие соответствие действующим Нормам по сопротивлению усталости.

7 Проведены ходовые динамико-прочностные испытания опытного состава вагонов моделей 81-760, 81-761 с тележками новой конструкции, показавшие наличие у рам тележек требуемых прочностных характеристик. Испытания проходили на Московском метрополитене.

8 Выполнен технико-экономический расчет, показавший наличие полезного экономического эффекта от внедрения комплекта тележек с новыми рамами для одного электропоезда (16 тележек): на расчетный период в 31 год более 59 млн руб., за один год более 1,9 млн руб.

9 В 2012 году на Московском метрополитене началась эксплуатация вагонов моделей 81-760, 81-761, оборудованных рамами тележек новой конструкции.

Результаты работы, изложенные выше в пунктах 4 - 6, выполнены диссертантом в составе специального конструкторского бюро ОАО «Метровагонмаш».

Заключение. К моменту начала нашего исследования в области технических наук, связанных с построением рам тележек тягового подвижного состава, а также с изучением их прочностных и надежностных характеристик сложилось следующее положение. Имеется относительно большое количество работ по проектированию и испытанию рам тележек. Достаточно подробно разработаны теоретические вопросы обоснования прочностных норм, оценки прочности, экспериментального исследования прочностных характеристик. Имеется также ряд исследований по определению оптимальных сечений несущих элементов рам тележек, влиянию концентраторов напряжений на напряженно-деформированное состояние и сопротивление усталости.

Однако имеется явно недостаточное количество работ, посвященных исследованию рам тележек в целом, затрагивающих в комплексе все стадии жизненных циклов рам тележек. Также можно отметить небольшое количество исследований непосредственно по теме рам тележек вагонов метрополитена. Как было показано в параграфах 1.1 и 1.2 рамы тележек вагонов метрополитена имеют специфические особенности, требующие в ряде случаев отдельных исследований. Имеющиеся работы, во-первых, затрагивают локальные проблемы, связанные с исследованием отдельных узлов или конструктивных исполнений рам тележек. Во-вторых, последнее серьезное диссертационное исследование проводилось более 10 лет тому назад.

Можно сформулировать целый ряд сложившихся на момент начала исследования вопросов, требующих восполнения пробела в системе знаний, связанных с объектом исследования:

- отсутствие комплексного анализа многочисленных конструктивных исполнений рам тележек вагонов метрополитена;
- отсутствие современных статистических моделей, позволяющих определить показатели надежности;

- отсутствие исследований, связанных с изучением особенностей эксплуатации рам тележек в условиях современных мегаполисов России;
- отсутствие анализа конструкций и результатов эксплуатации вагонов метрополитена новых моделей;
- отсутствие научно обоснованной концепции развития объекта на перспективу;
- отсутствие комплексного научного подхода к построению рам тележек, используя с одной стороны имеющийся опыт проектирования и эксплуатации, а с другой стороны современные методы проектирования.

Проведенное исследование позволило сформулировать следующую новую концепцию.

1 Развитие имеющихся конструктивных схем рам тележек вагонов метро старых серий началось с 1960-х годов и происходило путем использования фактически одной конструктивной схемы. Постоянное увеличение эксплуатационных нагрузок на столичных метрополитенах требовало изменения режимов нагружения и усиления конструкции. Прежде всего, это увеличение вертикальной статической и динамической нагрузки, увеличение мощности тяговых электродвигателей. С целью обеспечения требуемых прочностных характеристик производились постоянные модернизации рам тележек с созданием многочисленных конструктивных исполнений.

Настоящая работа концептуально обосновывает эволюционное достижение семейством сварноштампованных рам тележек предельного состояния и бесперспективность дальнейших работ по их модернизации для условий эксплуатации метрополитенов Москвы и Санкт-Петербурга с рекомендацией продолжения их эксплуатации до выработки ресурса и замены на рамы листовых конструкций (коробчатого сечения).

2 Обосновывается возможность дальнейшей эксплуатации и производства сварноштампованных рам тележек для «малых» (нестоличных) метрополитенов России.

3 Анализ конструкций ходовых частей вагонов метрополитена моделей «Яуза» и «Русич» показывает технико-экономическую нецелесообразность их дальнейшего производства для имеющихся условий эксплуатации.

4 Научно обосновывается наиболее приоритетное направление развития рам тележек в метровагоностроении. На наш взгляд, это создание сварных листовых рам (коробчатого сечения) с оптимизацией сечений балок рамы в соответствии с действующими нагрузками.

Выводы. По результатам исследования можно сформулировать следующие выводы.

1 Выполненные методами математической статистики расчеты с вероятностью до 0,95 позволяют определить вид законов распределения наработки на отказ для трех основных групп рам тележек вагонов Московского метрополитена:

- закон распределения Вейбулла-Гнеденко для поводковых рам вагонов модификаций серии E;
- логарифмически-нормальный закон распределения для поводковых рам тележек вагонов серий 81-717/714;
- логарифмически-нормальный закон распределения для шпинтонных рам тележек вагонов серий 81-717.5/714.5 и модификаций.

2 Установленные показатели надежности одинаковых конструктивных исполнений рам тележек на «малых» и столичных метрополитенах России находятся в тесной связи с различными условиями эксплуатации, что указывает на сильное выделение столичных метрополитенов из группы российских метрополитенов и необходимость разработки вагонов нового поколения для условий эксплуатации Москвы и Санкт-Петербурга.

3 Проектирование сварных листовых рам тележек является наиболее перспективным путем развития в современном метровагоностроении с обеспечением требуемых прочностных, технологических, эксплуатационных характеристик. Кроме того, подобные конструкции позволяют строить оптимальные сечения несущих элементов в соответствии с действующими нагрузками при условии применения современных расчетных комплексов.

4 Разработанная методика технико-экономического расчета позволяет оценить экономическую эффективность использования различных типов подвижного состава метрополитенов.

Рекомендации. На основании выполненного диссертационного исследования дается ряд, необходимых на наш взгляд, рекомендаций.

Надежность рам тележек является сложным комплексным показателем, зависящим от многочисленных факторов, в том числе временных. Поэтому случайность воздействия многих факторов на любом этапе жизненного цикла изделия может привести к существенному изменению параметров надежности. Рекомендуется создание (восстановление) на машиностроительных предприятиях и метрополитенах специализированных групп надежности для сбора данных по отказам и построения статистических моделей. Это существенно повысит представление о совпадении или несовпадении теоретических и прагматических критериев оценки рам тележек, даст однозначные направления дальнейшей работы.

Обоснованная и разработанная конструкция рамы тележки вагона метрополитена современного мегаполиса, как отмечалось выше, обладает рядом прочностных и конструкторско-технологических преимуществ. Однако, несомненно, что новое изделие требует постоянного пристального внимания. Рекомендуется ряд дополнительных исследований, направленных на изучение особенностей рам тележек листовых (коробчатых) конструкций из низколегированных сталей:

- исследования предложенных конструктивных исполнений моторных и редукторных кронштейнов с целью изучения их напряженно-деформированного состояния, технологических особенностей, ремонтпригодности;
- разработка научно обоснованных рекомендаций по конструированию, производству и эксплуатации листовых рам тележек (материалы, сварка, контроль, упрочнение, технология ремонта).

Перспективы дальнейшей разработки темы на наш взгляд следующие:

1 Разработка научно обоснованных методических указаний по проектированию и изготовлению рам тележек вагонов метрополитена.

2 Продолжение работ по исследованию особенностей эксплуатации на различных метрополитенах России и ближнего зарубежья. С теоретической точки зрения это позволит изучить нагруженность рам тележек в условиях различных нестационарных процессов изменения динамических напряжений. С практической точки зрения данные исследования помогут в выработке научно обоснованных требований к подвижному составу для конкретных условий эксплуатации, что особенно актуально в настоящий момент, когда предложение различных типов подвижного состава, включая подвижной состав зарубежных производителей, крайне велико.

3 Проведение исследований с целью дальнейшей отработки методики расчета рам тележек. Например, для рам тележек вагонов метрополитена необходимы исследования процессов входа и выхода пассажиров на станциях, которые представляют собой многоцикловое нагружение за период эксплуатации. Также необходимы исследования по влиянию на напряженно-деформированное состояние рам тележек механического тормоза.

4 В связи с тем, что появились новые конструктивные решения и новые технологии производства рам тележек, а масштабные исследования влияния концентраторов напряжений на напряженно-деформированное состояние рам и сопротивление усталости выполнялись относительно давно, требуются новые исследования концентраторов напряжений конструктивного и технологического характера в сварных несущих конструкциях. Результаты этих исследований должны быть введены в виде конкретных требований по снижению концентраторов напряжений в соответствующие нормативные документы.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- БГТУ – Брянский государственный технический университет
- ВНИИВ – Внеотраслевой научно-исследовательский институт вагоностроения
- ВНИИЖТ – Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта
- ВНИКТИ – Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава
- ГосНИИВ – Государственный научно-исследовательский институт вагоностроения (сегодня НИИ вагоностроения)
- ГУП – государственное унитарное предприятие
- ДИИТ – Днепропетровский институт инженеров железнодорожного транспорта
- ИЦ ТПС ЖТ – Испытательный центр технических и программных средств железнодорожного транспорта
- КД – конструкторская документация
- кол-во – количество
- ЛИИЖТ – Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта (в настоящее время Петербургский государственный университет путей сообщения)
- МАИ – Московский авиационный институт
- МИИТ – Московский институт инженеров железнодорожного транспорта (в настоящее время Московский государственный университет путей сообщения)
- МКЭ – метод конечных элементов
- млн – миллион
- млрд – миллиард
- МПС – Министерство путей сообщения
- НАН – Национальная академия наук (Украины)

НДС	–	напряженно-деформированное состояние
пасс.-км	–	пассажиры-километр
поз.	–	позиция
ОАО РЖД	–	ОАО «Российские железные дороги»
РИИЖТ	–	Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта (в настоящее время Ростовский государственный университет путей сообщения)
РИС	–	рельсоиспытательная станция
руб.	–	рубль
СЖЦ	–	стоимость жизненного цикла
СКБ	–	специальное конструкторское бюро
СНиП	–	строительные нормы и правила
т•км	–	тонно-километр
ТО	–	техническое обслуживание
ТР	–	текущий ремонт
тыс.	–	тысяча
чел.	–	человек
ЭВМ	–	электронная вычислительная машина

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Анализ состояния металла и конструкции в целом узла рамы тележки вагона метрополитена в зоне образования трещин: отчет о НИР / Ин-т надежности машин Академии наук Беларуси, Белорусский науч.-исслед. и конструкторско-технологический ин-т сварки и защитных покрытий; исполн.: Лобачев А.С., Писарев В.А., Ползикова В.С. и др. – Минск, 1995. – 27 с.

2 Аснис, А.Е. Повышение прочности сварных конструкций / А.Е. Аснис, Г.А. Иващенко. – Киев: Наукова думка, 1978. – 193 с.

3 Баранов, И.В. Некоторые вопросы конструирования и технологии изготовления элементов и узлов рам тележек подвижного состава, связанные с повышением усталостной прочности / И.В. Баранов, Ю.А. Ермолин, В.Ф. Рева // Труды МИИТа. – М., 1968. – Вып. 296. – С. 3–20.

4 Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 234 с.

5 Болотин, В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.

6 Броек, Д. Основы механики разрушения / Давид Броек; пер. с англ. – М.: Высшая школа, 1980. – 366 с.

7 Бунин, Б.Б. Оценка долговечности и остаточного ресурса рам тележек локомотивов / Б.Б. Бунин, Э.С. Оганьян, Т.М. Пономарева, В.Г. Шевченко // Тяжелое машиностроение. – 2007. – № 11. – С. 31–33.

8 Буханцев, А.А. Исследование напряженного состояния балок коробчатого сечения с накладками различной формы / А.А. Буханцев // Вестник ВНИИЖТ. – М., 1979. – № 7. – С. 24–27.

9 Буханцев, А.А. Рациональное конструирование некоторых узлов рам тележек тягового подвижного состава: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Буханцев Андрей Александрович. – М., 1990. – 24 с.

10 Вагон метро Ежб. Техническое описание и инструкция по уходу и эксплуатации. Книга 1. – Мытищи: Мытищинский машиностроительный завод, 1974. – 109 с.

11 Вагон метрополитена моделей 81-717 и 81-714. Техническое описание и инструкция по эксплуатации: 9.7170.30.00.001.00 ТО. Книга 1. – Мытищи: Мытищинский машиностроительный завод, 1978. – 168 с.

12 Вагон метрополитена моделей 81-717.5М и 81-714.5М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации: 9.7175.30.00.001.01 ТО. Книга 1. – Мытищи: АО «Метровагонмаш», 1993. – 245 с.

13 Вагоны метрополитена моделей 81-720 и 81-721. Руководство по эксплуатации: 720.00.00.001 РЭ. – Мытищи: АО «Метровагонмаш», 1998. – 269 с.

14 Вагоны метрополитена моделей 81-740 и 81-741. Руководство по эксплуатации: 740.00.00.001РЭ. – Мытищи: ОАО «Метровагонмаш», 2003. – 343 с.

15 Вариантный расчет на прочность опытной рамы тележки вагонов серии 81-717/714 согласно «Нормам для проектирования, расчета и оценки прочности и динамики механической части вагонов метрополитена Н-034-01124328-2001» / ОАО «Метровагонмаш»; главный конструктор СКБ Колесин А.Ю. – Мытищи, 2006. – 30 с.

16 Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1988. – 480 с.

17 Веретник, Л.Д. Технологичность сварных конструкций / Л.Д. Веретник. – Харьков: Прапор, 1969. – 88 с.

18 Вершинский, С.В. Динамика вагона: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, В.Д. Хусидов; под общ. ред. С.В. Вершинского. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.

19 Вопросы механической усталости: сборник докладов / Под общ. ред. С.В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1964. – 380 с.

20 Галкин, В.Г. Надежность тягового подвижного состава: учеб. пособие / В.Г. Галкин, В.П. Парамзин, В.А. Четвергов. – М.: Транспорт, 1981. – 184 с.

- 21 Гуляев, А.П. *Металловедение* / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 540 с.
- 22 *Движение и транспорт: информационная брошюра по заказу Правительства Москвы.* – М., 2011. – 32 с.
- 23 Егоренков, А.В. *Обоснование технических решений по повышению усталостной долговечности рам шпинтонного типа тележек вагонов метро: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07* / Егоренков Александр Владимирович. – М., 2002. – 20 с.
- 24 Екобори, Т. *Научные основы прочности и разрушения материалов / Такео Екобори; пер. с япон.* – Киев: Наукова Думка, 1978. – 352 с.
- 25 Зайнетдинов, Р.И. *Оценка ресурса несущих конструкций подвижного состава по критерию усталостного повреждения: учеб. пособие* / Р.И. Зайнетдинов, С.Н. Киселев. – М.: МИИТ, 2005. – 143 с.
- 26 Зайнетдинов, Р.И. *Развитие методов оценки работоспособности несущих конструкций подвижного состава с использованием закономерностей самоорганизации и самоподобия: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.22.07* / Зайнетдинов Рашид Исламгулович. – М., 2000. – 47 с.
- 27 Зайниддинов, Н.С. *Моделирование напряженно-деформированного состояния рамы тележки тепловоза* / Н.С. Зайниддинов // *Известия Петербургского университета путей сообщения.* – СПб., 2010. – Вып. 3 (24). – С. 98–105.
- 28 Зайниддинов, Н.С. *Оценка остаточного ресурса рам тележек тепловозов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07* / Зайниддинов Нуриддин Савранбек угли. – СПб., 2010. – 16 с.
- 29 *Заключение по результатам усталостных (стендовых вибрационных) испытаний. Рамы тележки вагона метрополитена модели 81-760 (81-761): отчет об испытаниях* / Испытательный центр технических и программных средств ж.-д. транспорта (ИЦ ТПС ЖТ); рук. испытаний Капанадзе Г.Р. – М., 2010. – 28 с.
- 30 *Заключение по результатам ходовых динамико-прочностных испытаний. Рекомендации по модернизации шпинтонных узлов рамы тележки*

вагона метрополитена серии 81: отчет о НИР / Науч.-исслед. ин-т ж.-д. транспорта (ВНИИЖТ); рук. работы Галахов А.Н. – М., 2003. – 39 с.

31 Закс, М.Н. Учет особенностей эксплуатации метровагонов в расчетах долговечности / М.Н. Закс, Л.Д. Кузьмич, Ю.В. Каляжнов, А.И. Поляков // Труды ВНИИВ. – М., 1978. – Вып. 32. – С. 14–24.

32 Закс, М.Н. Повышение надежности рамы тележки вагона метрополитена мод. 81-717/714 / М.Н. Закс, А.Л. Куряк, Ю.В. Каляжнов // Тяжелое машиностроение. – 1995. – № 4. – С. 16–19.

33 Зарубежные нормативы расчетов на прочность и проектирования механической части вагонов: обзор / Всесоюзный науч.-исслед. ин-т вагоностроения (ВНИИВ). – М., 1975. – 155 с.

34 Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / Ольгерд Зенкевич, Кеннет Морган; пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

35 Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / Ольгерд Зенкевич; пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 542 с.

36 Инструкция по эксплуатации, освидетельствованию и ремонту листовых рам тележек вагонов метрополитена: 2.7175.31.20.007.00РД / В.Б. Попов, Ю.С. Бухарова, Р.В. Миронов. – Мытищи: ОАО «Метровагонмаш», 2012. – 155 с.

37 Иосилевич, Г.Б. Концентрация напряжений и деформации в деталях машин / Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.

38 Исаев, И.П. Выбор уровня надежности рам тележек по критерию минимума затрат / И.П. Исаев, А.Н. Савоськин, Ю.В. Каляжнов // Оборудование электроподвижного состава. Межвузовский сборник трудов институтов ж.-д. транспорта. – М.: МИИТ, 1979. – Вып. 648. – С. 63–69.

39 Исаев, И.П. Прогнозирование надежности рам тележек электроподвижного состава как восстанавливаемых изделий / И.П. Исаев, А.Н. Савоськин, Ю.В. Каляжнов // Проблемы механики наземного транспорта. Межвузовский сборник научных трудов институтов ж.-д. транспорта. – Днепропетровск: ДИИТ, 1977. – Вып. 195/24. – С. 10–13.

40 Исследование работы рам тележек вагонов типа Е и узла поводковой связи с рамой тележки: отчет о НИР / Всесоюзный науч.-исслед. ин-т ж.-д. транспорта (ВНИИЖТ); исполн.: Колесин Ю.В., Кондрашов В.М., Невежин Н.П., Петров В.Я., Сорокин Г.И. – М., 1979. – 68 с. – Шифр работы И859-Т-79, р. 4.

41 Исследования прочности рам тележек вагонов метрополитена производства Калининского вагоностроительного завода: отчет о НИР / Всесоюзный науч.-исслед. ин-т вагоностроения (ВНИИВ); рук. темы Подлитов Н.И. – М., 1983. – 66 с. – № ГР 01821045951. – Шифр работы 81.84.1.122/2.

42 Каляжных, Ю.В. Оценка и прогнозирование надежности рам тележек вагонов метрополитена: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Каляжных Юрий Владимирович. – М., 1990. – 24 с.

43 Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 272 с.

44 Кац, Г.Б. Техничко-экономический анализ и оптимизация конструкции машин / Г.Б. Кац, А.П. Ковалев. – М.: Машиностроение, 1981. – 214 с.

45 Киселев, С.Н. Анализ напряженно-деформированного состояния в круговых швах рам тележек вагонов метро / С.Н. Киселев, А.С. Киселев, В.В. Смирнов, А.В. Саврухин // Сварочное производство. – 1993. – № 4. – С. 19–20.

46 Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.

47 Комаровский, А.А. Прогнозирование остаточного ресурса и долговечности / А.А. Комаровский // Тяжелое машиностроение. – 2000. – № 12. – С. 16–19.

48 Коцаньда, С. Усталостное разрушение металлов / Станислав Коцаньда; пер. с польск. – М.: Металлургия, 1976. – 455 с.

49 Крайчик, М.М. Влияние скрытых дефектов на сопротивление усталости сварных рам тележек локомотивов / М.М. Крайчик, В.Б. Цкипуришвили, А.А. Буханцев, В.Г. Солодкова // Вестник ВНИИЖТ. – М., 1987. – № 3. – С. 23–26.

50 Лалле, П. Релаксация остаточных сварочных напряжений / П. Лалле, М. Римбо; пер. с франц. / Центральный науч.-исслед. ин-т информации и технико-экономических исследований ж.-д. транспорта. – М., 1996. – 20 с. – Рег. № П29810.

51 Лукин, В.В. Конструирование и расчет вагонов: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / В.В. Лукин, Л.А. Шадур, В.Н. Котуранов, А.А. Хохлов, П.С. Анисимов; под общ. ред. В.В. Лукина. – М.: УМК МПС России, 2000. – 728 с.

52 Мак-Ивили, А. Дж. Анализ аварийных разрушений / Артур Дж. Мак-Ивили; пер. с англ. – М.: Техносфера, 2010. – 416 с.

53 Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2 ч. / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2005.

Ч. 1: Критерии прочности и ресурса. – 494 с.

Ч. 2: Обоснование ресурса и безопасности. – 610 с.

54 Медель, В.Б. Подвижной состав электрических железных дорог. Конструкция и динамика: учеб. для институтов ж.-д. транспорта / В.Б. Медель. – М.: Транспорт, 1974. – 232 с.

55 Медель, В.Б. Проектирование механической части электроподвижного состава: учеб. пособие для вузов / В.Б. Медель. – М.: Трансжелдориздат, 1963. – 424 с.

56 Методика определения показателей технико-экономической эффективности подвижного состава и других сложных технических систем метрополитенов / А.В. Ершов, Л.Н. Дроздинская, В.Б. Попов. – М.: УПЦ «Талант», 2013. – 66 с.

57 Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта (основные положения): утв. распоряжением ОАО РЖД от 27 декабря 2007 г. № 2459р. / ОАО РЖД. – М., 2007. – 62 с.

58 Механическая часть тягового подвижного состава: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / Под общ. ред. И.В. Бирюкова. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.

59 Моисеенко, В.П. Материалы и их поведение при сварке / В.П. Моисеенко. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2009. – 304 с.

60 Нагруженность элементов конструкции вагона / Под общ. ред. В.Н. Котуранова. – М.: Транспорт, 1991. – 238 с.

61 Николаев, Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.

62 Нормы для проектирования, расчета и оценки прочности и динамики механической части вагонов метрополитена колеи 1520 мм: Н-034-01124328-2001: утв. регистром сертификации на Федеральном ж.-д. транспорте: ввод. в действие с 01.08.01. – М.: ВНИИЖТ, 2001. – 158 с. – В надзаг.: ВНИИЖТ, АО «Метровагонмаш».

63 Нормы для проектирования, расчета и оценки прочности и динамики механической части вагонов метрополитена колеи 1520 мм: СТО СДС ОПЖТ - 05 - 2010: утв. Объединением производителей ж.-д. техники: ввод. в действие с 01.01.11. – М.: ВНИИЖТ, 2010. – 120 с.

64 Нормы для расчета и проектирования механической части новых и модернизируемых вагонов метрополитенов СССР колеи 1520 мм: утв. М-вом тяжелого и транспортного машиностроения: ввод. в действие с 01.04.87. – М.: ВНИИВ, 1987. – 119 с. – В надзаг.: ВНИИВ, ВНИИЖТ, ММЗ.

65 Норри, Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де-Фриз; пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 304 с.

66 Обоснование критериев оценки динамико-прочностных качеств подвижного состава метрополитенов: отчет о НИР / Центр. науч.-исслед. ин-т М-ва путей сообщения; исполн.: Кондрашов В.М., Колесин Ю.В., Крайчик М.М., Мейснер Б.А. и др. – М., 1977. – 63 с. – Шифр работы И512-Т-80, р.7а.

67 Оганьян, Э.С. Критерии несущей способности конструкций локомотивов в экстремальных условиях нагружения: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.22.07 / Оганьян Эдуард Сергеевич. – М., 2004. – 48 с.

68 Определение параметров надежности деталей и узлов локомотивов: методические указания к практическим занятиям. В 2 ч. / А.Д. Пузанков. – М.: МИИТ, 1990.

Ч. 1. – 32 с.

Ч. 2. – 44 с.

69 Осяев, А.Т. Жизненный цикл техники и его стоимость / А.Т. Осяев, А.Б. Подшивалов // Сборник трудов ВНИИЖТ. – М., 2006. – С. 40–47.

70 Патент на полезную модель № 97100 Российская Федерация, МПК В61F5/52. Продольная балка рамы тележки рельсового транспортного средства / Попов В.Б.; заявитель и патентообладатель Попов В.Б. – № 2010114848; заявл. 15.04.2010; опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24. – 4 с.: ил.

71 Патент на полезную модель № 97101 Российская Федерация, МПК В61F5/52. Шпинтонный узел рамы тележки / Миронов Р.В., Мочалов А.И., Попов В.Б.; заявитель и патентообладатель ОАО «Метровагонмаш». – № 2010116621; заявл. 28.04.2010; опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24. – 4 с.: ил.

72 Патент на полезную модель № 99413 Российская Федерация, МПК В61F5/52. Узел соединения продольной и концевой балок рамы тележки вагона метро / Попов В.Б., Рытов С.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Метровагонмаш». – № 2010126741; заявл. 01.07.2010; опубл. 20.11.2010, Бюл. № 32. – 4 с.: ил.

73 Пейрик, Х.И. Материалы, применяемые в вагоностроении за рубежом / Х.И. Пейрик // Применение новых материалов и сплавов. Экономия материалов. – М.: НИИ Информтяжмаш, 1972. – № 3. – 33 с.

74 Петерсон, Р. Коэффициенты концентрации напряжений / Р. Петерсон; пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 302 с.

75 Повышение надежности экипажной части тепловозов / Под общ. ред. Л.К. Добрынина. – М.: Транспорт, 1984. – 248 с.

76 Попов, В.Б. Надежность рам тележек метровагонов / В.Б. Попов // Мир транспорта. – 2012. – № 3. – С. 54-59.

77 Попов, В.Б. Рама тележки в перспективных метровагонах / В.Б. Попов // Мир транспорта. – 2011. – № 3. – С. 70-74.

78 Попов, В.Б. Пути повышения надежности рам тележек вагонов метрополитена / В.Б. Попов // Труды МИИТ: Тринадцатая Научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». – М., 2012. – С. V-20 – V-21.

79 Проведение совместно с ММЗ усталостных испытаний узлов и деталей вагонов метрополитена: отчет об испытаниях / Всесоюзный науч.-исслед. ин-т вагоностроения (ВНИИВ). – М., 1977. – 27 с. – Шифр работы 11930/29-76.

80 Проведение стендовых испытаний узлов и деталей вагонов метрополитена: отчет об испытаниях / Всесоюзный науч.-исслед. ин-т вагоностроения (ВНИИВ); исполн.: Моисеев Е.В. – М., 1978. – 36 с. – Шифр работы 11930/56-77.

81 Протокол динамико-прочностных испытаний вагона метрополитена серии 81-717.6К (81-714.6К) с рамой тележки по чертежу № 2.7175.31.20.010.00 / ВНИИЖТ; рук. работы Отбоев А.А. – М., 2007. – 18 с.

82 Протокол динамико-прочностных испытаний вагонов метрополитена моделей 81-760/81-761 с тележкой 7600.31.00.002СБ / ВНИИЖТ; рук. работы Отбоев А.А. – М., 2012. – 29 с.

83 Протокол контрольных стендовых вибрационных испытаний кронштейнов подвески редуктора рамы тележки вагона метрополитена модели 81-760 (81-761) / Науч.-исслед. ин-т ж.-д. транспорта (ВНИИЖТ); рук. работы Буханцев А.А. – М., 2010. – 8 с.

84 Протокол усталостных (стендовых вибрационных) испытаний рамы тележки вагона метрополитена модели 81-760 (81-761) / Испытательный центр технических и программных средств ж.-д. транспорта (ИЦ ТПС ЖТ); рук. работы Капанадзе Г.Р. – М., 2010. – 8 с.

85 Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / Под общ. ред. А.Н. Савоськина. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

86 Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин / Под общ. ред. Н.А. Махутова. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. – 576 с.

87 Пузанков, А.Д. Методы расчета и использования показателей надежности в эксплуатации: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / А.Д. Пузанков. – М.: МИИТ, 2004. – 112 с.

88 Пузанков, А.Д. Надежность конструкций локомотивов: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / А.Д. Пузанков. – М.: МИИТ, 1999. – 200 с.

89 Пузанков, А.Д. Экипаж перспективных вагонов метрополитена / А.Д. Пузанков, В.Б. Попов // Мир транспорта. – 2011. – № 1. – С. 56-61.

90 Разработка проекта инструктивных указаний по восстановлению поврежденных сварных узлов рам тележек локомотивов и технологические приемы их упрочнения: отчет о НИР / Центр. науч.-исслед. ин-т М-ва путей сообщения (ЦНИИ МПС); исполн.: Крайчик М.М., Павлов Н.В., Цкипуришвили В.Б. – М, 1977. – 99 с. – Шифр работы И116-Т-77, р.9.

91 Рама моторной тележки вагона модели 81-740. Расчет: 740.31.20.040.2 РР / ЗАО «Метровагонмаш»; директор СКБ метро Грицаев А.И. – Мытищи, 2001. – 141 с.

92 Рама тележки. Расчет: 2.7170.31.20.011.30 РР3 / ПО «Метровагонмаш»; гл. конструктор Смирнов В.Н. – Мытищи, 1988. – 177 с.

93 Рама тележки. Расчет: 2.7170.31.20.017.20 РР2 / ПО «Метровагонмаш»; директор СКБ метро Смирнов В.Н. – Мытищи, 1989. – 170 с.

94 Рама тележки. Расчет: 720.31.20.040 РР2 / ЗАО «Метровагонмаш»; гл. конструктор Смирнов В.Н. – Мытищи, 1997. – 197 с.

95 Расчет рамы тележки вагона метро типа 81-717, 81-714: 2.7170.31.20.011.30 РР1 / Мытищинский машиностроительный завод; гл. конструктор Смирнов В.Н. – Мытищи, 1978. – 152 с.

96 Расчет тележки вагона метро типа Е (бесчелюстной). Рама тележки / Мытищинский машиностроительный завод; гл. конструктор Разуваев Н.В. – Мытищи, 1966. – 122 с.

97 Расширенное заключение по результатам динамико-прочностных и ударных испытаний вагона легкого метро серии 81-740 № 0002: отчет об испытаниях / ВНИИЖТ; рук. работы Отбоев А.А. – М., 2003. – 61 с.

98 Рекомендации по применению низколегированных высокопрочных сталей для сварных конструкций: отчет о НИР / Институт электросварки им. Е.О. Патона. – Киев, 1977. – 77 с.

99 Романов, А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении / А.Н. Романов. – М.: Наука, 1988. – 280 с.

100 Савоськин, А.Н. Исследование нестационарной случайной эксплуатационной нагруженности деталей тележек вагонов метрополитена / А.Н. Савоськин, М.Н. Закс, Ю.В. Каляжнов, Е.В. Сердобинцев // Труды ВНИИВ. – М., 1978. – Вып. 35. – С. 32–41.

101 Сварные конструкции локомотивных тележек: Основные положения проектирования и изготовления / Под общ. ред. К.П. Королева. – М.: Транспорт, 1971. – 72 с.

102 Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Ларри Сегерленд; пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

103 Серенсен, С.В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.

104 Смирнов, В.В. Совершенствование конструкции и технологии изготовления несущих сварочных конструкций вагонов метрополитена на основе уточненной оценки напряженно-деформированного состояния: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Смирнов Вячеслав Валентинович. – М., 1995. – 24 с.

105 Стендовые вибрационные испытания опытной рамы тележки вагонов метрополитена серии 81-717/714: отчет об испытаниях / ВНИИЖТ; рук. работы Буханцев А.А. – М., 2006. – 28 с.

106 Стендовые испытания сборочных единиц тележки вагона метрополитена: отчет об испытаниях / Всесоюзный науч.-исслед. ин-т вагоностроения (ВНИИВ). – М., 1981. – 38 с.

107 Стренг, Г. Теория метода конечных элементов / Гилберт Стренг, Джордж Дж. Фикс; пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 350 с.

108 Трощенко, В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова думка, 1987. – 252 с.

109 Усталостные испытания рамы тележки вагона метрополитена модели 81-720: отчет об испытаниях / ВНИИЖТ. – М., 1990. – 54 с.

110 Усталостные испытания сварных рам тележек вагонов метрополитена типа Е. Предложения: отчет о НИР / ВНИИЖТ; рук. темы Колесин Ю.В. – М., 1983. – 57 с. – № ГР 01824015564. – Шифр работы И512-Т-83, р.1.

111 Хейвуд, Р.Б. Проектирование с учетом усталости / Р.Б. Хейвуд; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.

112 Цкипуришвили, В.Б. Прочность балок коробчатого сечения с накладками различной формы / В.Б. Цкипуришвили, А.А. Буханцев, Н.В. Павлов, М.М. Крайчик // Сварочное производство. – 1977. – № 12. – С. 37–39.

113 Четвергов, В.А. Надежность локомотивов: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / В.А. Четвергов, А.Д. Пузанков. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с.

114 Шлюшенков, А.П. Сравнительная оценка материалов по долговечности и вероятности усталостного разрушения / А.П. Шлюшенков, В.А. Татаринцев // Вестник машиностроения. – 1986. – № 3. – С. 13–17.

115 Экономика транспорта: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / Под общ. ред. Н.П. Терешинной. – М.: УМК МПС России, 2001. – 600 с.

116 Эксплуатационная надежность тепловозов / Под общ. ред. Н.А. Фуфрянского. – М.: Транспорт, 1966. – 208 с.

117 Vos, G. Fit-for-Use-Analyse für die Prüfung der Festigkeit von Fahrwerkskomponenten / G. Vos, J. Peen, M. Sander, H.A. Richard // Der Eisenbahningenieur. – 2009. – Heft 1. – S.40–45.

СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

Перечень рисунков		
№ п/п	Номер и наименование рисунка	Страница
1	Рисунок 1 – Трещинообразование рамы тележки вагона метрополитена серии 81-714.5 (трещина на продольной балке рамы в зоне средней шпинтонной втулки)	5
2	Рисунок 1.1 – Статистика по отказам рам тележек вагонов старых серий (Московский метрополитен, 2010 год)	16
3	Рисунок 1.2 – Динамика изменения объема пассажироперевозок и инвентарного парка вагонов на Московском метрополитене	18
4	Рисунок 1.3 – Алгоритм обоснования и разработки конструкции рамы тележки вагона метрополитена современного мегаполиса	31
5	Рисунок 2.1 – Общий вид тележки вагонов серий 81-717.5, 81-714.5 и модификаций	35
6	Рисунок 2.2 – Общий вид тележки вагонов моделей 81-740, 81-741 и модификаций	38
7	Рисунок 2.3 – Структура парка вагонов Московского метрополитена по состоянию на 2011-01-01	40
8	Рисунок 2.4 – Общий вид рамы тележки модификаций вагонов серии Е	41
9	Рисунок 2.5 – Сечение балок рам тележек сварноштампованной конструкции	42
10	Рисунок 2.6 – Общий вид рамы тележки вагонов метрополитена серий 81-717, 81-714	44
11	Рисунок 2.7 – Общий вид рамы тележки вагонов метрополитена серий 81-717.5, 81-714.5	47
12	Рисунок 2.8 – Конструкция шпинтонной втулки сварноштампованной рамы тележки	48
13	Рисунок 2.9 – Трещинообразование шпинтонных втулок	50
14	Рисунок 2.10 – Фрагмент фотографии разрушенной шпинтонной рамы тележки	51
15	Рисунок 2.11 – Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в элементах сварноштампованной рамы тележки вагонов серий 81-717.5, 81-714.5	53
16	Рисунок 2.12 – Общий вид листовой рамы тележки вагонов метрополитена серий 81-717.5, 81-714.5	55
17	Рисунок 2.13 – Сечение балок рам тележек листовой конструкции	55
18	Рисунок 2.14 – Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в элементах листовой шпинтонной рамы тележки вагонов серий 81-717.5, 81-714.5 и модификаций	56
19	Рисунок 2.15 – Общий вид рамы тележки вагонов метрополитена моделей 81-720, 81-721 (81-740, 81-741) и модификаций	58
20	Рисунок 2.16 – Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в элементах моторной рамы тележки вагонов моделей 81-740, 81-741	60
21	Рисунок 2.17 – Распределение наработки до отказа поводковых рам тележек модификаций серии Е	61
22	Рисунок 2.18 – Распределение отказов рам тележек вагонов метрополитена модификаций серии Е по месту возникновения	62

Продолжение перечня рисунков		
№ п/п	Номер и наименование рисунка	Страница
23	Рисунок 2.19 – Распределение наработки до отказа поводковых рам тележек вагонов серий 81-717/714	63
24	Рисунок 2.20 – Распределение отказов рам тележек вагонов метрополитена серий 81-717/714 по месту возникновения	63
25	Рисунок 2.21 – Распределение наработки до отказа шпинтонных рам тележек вагонов метрополитена серий 81-717.5/714.5 и модификаций	64
26	Рисунок 2.22 – Распределение отказов рам тележек вагонов метрополитена серий 81-717.5/714.5 и модификаций по месту возникновения	65
27	Рисунок 2.23 – Характерные места трещинообразований рам тележек вагонов серий 81-717.5/714.5 и модификаций	65
28	Рисунок 2.24 – Зависимость количества отказов рам тележек от загруженности (населенности) вагона и его среднегодового пробега	68
29	Рисунок 3.1 – Общий вид тележки перспективных вагонов метрополитена моделей 81-760, 81-761	78
30	Рисунок 3.2 – Чертеж общего вида тележек вагонов моделей 81-760, 81-761	79
31	Рисунок 3.3 – Общий вид рамы тележки вагонов метрополитена моделей 81-760, 81-761	81
32	Рисунок 3.4 – Конструкция балок рамы тележки	82
33	Рисунок 3.5 – Узел соединения двух балок	82
34	Рисунок 3.6 – Кусочно-линейные базисные функции	86
35	Рисунок 3.7 – Этапы конечно-элементного моделирования	90
36	Рисунок 3.8 – Общий вид конечно-элементной модели рамы тележки	93
37	Рисунок 3.9 – Вид рамы тележки с сеткой конечных элементов	96
38	Рисунок 3.10 – Конечно-элементная сетка узла соединения продольной и центральной балок рамы тележки	96
39	Рисунок 3.11 – Схема нагружения конечно-элементной модели рамы тележки вертикальной статической нагрузкой	99
40	Рисунок 3.12 – Схема нагружения конечно-элементной модели рамы тележки вертикальной динамической нагрузкой	99
41	Рисунок 3.13 – Схема нагружения конечно-элементной модели кососимметричной нагрузкой	100
42	Рисунок 3.14 – Схема подвески тягового двигателя	101
43	Рисунок 3.15 – Схема подвески редуктора	101
44	Рисунок 3.16 – Схема нагружения конечно-элементной модели нагрузками от работы привода	102
45	Рисунок 3.17 – Схема нагружения конечно-элементной модели рамы тележки силами инерции (вертикальными) двигателей и редукторов	102
46	Рисунок 3.18 – Схема нагружения конечно-элементной модели рамы тележки нагрузками от продольных сил инерции	103
47	Рисунок 3.19 – Схема нагружения конечно-элементной модели при вписывании в кривую	104
48	Рисунок 3.20 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки, Па. Режим нагружения – вертикальная статическая нагрузка	105
49	Рисунок 3.21 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в зоне максимальных напряжений при режиме нагружения от вертикальной статической нагрузки, Па	105
50	Рисунок 3.22 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки, Па. Режим нагружения – вертикальная динамическая нагрузка	106

Продолжение перечня рисунков		
№ п/п	Номер и наименование рисунка	Страница
51	Рисунок 3.23 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в зоне максимальных напряжений при режиме нагружения от вертикальной динамической нагрузки, Па	106
52	Рисунок 3.24 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки, Па. Режим нагружения – кососимметричная нагрузка	107
53	Рисунок 3.25 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки для зоны максимальных напряжений при режиме от работы тягового привода (режим Па), Па	107
54	Рисунок 3.26 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки, Па. Режим нагружения – инерционные нагрузки от веса привода (режим Па)	108
55	Рисунок 3.27 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки для зоны максимальных напряжений при режиме инерционных нагрузок от веса привода (режим Па), Па	108
56	Рисунок 3.28 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки, Па. Режим нагружения – нагрузка от продольных сил инерции кузова (режим Па)	109
57	Рисунок 3.29 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки для зоны максимальных напряжений при режиме вписывания в кривую, Па	109
58	Рисунок 3.30 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в раме тележки, режим нагружения Па, Па	110
59	Рисунок 3.31 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в зоне максимальных напряжений рамы тележки, режим нагружения Па, Па	110
60	Рисунок 3.32 – Распределение эквивалентных напряжений в раме тележки по Мизесу, режим нагружения Пб, Па	111
61	Рисунок 3.33 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в зоне максимальных напряжений в раме тележки, режим нагружения Пб, Па	111
62	Рисунок 3.34 – Конструкторский принцип построения оптимальных сечений рамы тележки на примере продольной балки	116
63	Рисунок 3.35 – Конструкция моторного кронштейна шпинтонной сварноштампованной рамы тележки вагонов серий 81-717.5, 81-714.5	117
64	Рисунок 3.36 – Конструкция моторного кронштейна шпинтонной листовой рамы тележки вагонов серий 81-717.5, 81-714.5	118
65	Рисунок 3.37 – Конструкция моторного кронштейна новой конструкции	119
66	Рисунок 3.38 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в моторном кронштейне новой рамы тележки перспективного вагона, Па	120
67	Рисунок 4.1 – Схема нагружения рамы тележки вагона модели 81-760 при стендовых испытаниях вертикальными и рамными силами	123
68	Рисунок 4.2 – Тензодатчики в зоне соединения продольной и центральной балок	126
69	Рисунок 4.3 – Тензодатчики в зоне кронштейна крепления рычага буксы	127
70	Рисунок 4.4 – Опытная рама тележки на стенде ВНИИЖТ	127
71	Рисунок 4.5 – Зона возникновения усталостной трещины на кронштейне редуктора	129
72	Рисунок 4.6 – Фрагмент кронштейна редуктора с усталостной трещиной	129
73	Рисунок 4.7 – Первый вариант кронштейна подвешивания редуктора	132
74	Рисунок 4.8 – Новый вариант кронштейна подвешивания редуктора	132
75	Рисунок 4.9 – Образец для испытаний (с новыми кронштейнами редуктора)	133

Продолжение перечня рисунков		
№ п/п	Номер и наименование рисунка	Страница
76	Рисунок 4.10 – Схема нагружения, реализованная при проведении усталостных испытаний кронштейна подвешивания редуктора	133
77	Рисунок 4.11 – Схема расположения части тензометрических датчиков при проведении испытаний рамы тележки (вид рамы тележки сверху)	135
78	Рисунок 4.12 – Схема расположения части тензометрических датчиков при проведении испытаний рамы тележки (вид рамы тележки снизу)	135
Перечень таблиц		
№ п/п	Номер и наименование таблицы	Страница
1	Таблица 1.1 – Метрополитены России. Серии и модели вагонов, находящиеся в эксплуатации по состоянию на 2012-01-01	16
2	Таблица 1.2 – Количество перевозимых пассажиров и протяженность линий некоторых крупнейших метрополитенов мира	18
3	Таблица 1.3 – Потребность Московского метрополитена в новых вагонах на период до 2018 года	19
4	Таблица 2.1 – Основные характеристики метрополитенов России по состоянию на 2011-01-01	32
5	Таблица 2.2 – Классификация серий и моделей вагонов, эксплуатируемых на российских метрополитенах, по группам с близкими конструкциями тележек	33
6	Таблица 2.3 – Технические характеристики тележек вагонов метрополитена	34
7	Таблица 2.4 – Структура парка вагонов российских метрополитенов по состоянию на 2011-01-01	39
8	Таблица 2.5 – Статистические данные по отказам рам тележек инвентарного парка Московского метрополитена за 2010 год	61
9	Таблица 2.6 – Статистические данные по метрополитенам России за 2010 год	67
10	Таблица 3.1 – Основные технические характеристики проектируемых вагонов	74
11	Таблица 3.2 – Технические характеристики тележек вагонов моделей 81-760, 81-761	80
12	Таблица 3.3 – Механические характеристики стали 09Г2Д	91
13	Таблица 3.4 – Исходные данные для моделирования рамы тележки	92
14	Таблица 3.5 – Расчетные нагрузки	98
15	Таблица 3.6 – Значения амплитуд максимальных напряжений	113
16	Таблица 4.1 – Режимы нагружения рамы тележки при статических испытаниях	126
17	Таблица 4.2 – Режимы нагружения рамы тележки при вибрационных испытаниях	128
18	Таблица 4.3 – Результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований новой рамы тележки	136
19	Таблица 5.1 – Техничко-экономические характеристики вагонов	139
20	Таблица 5.2 – Техничко-экономические характеристики составов	139
21	Таблица 5.3 – Показатели работы Московского метрополитена	140
22	Таблица 5.4 – Расчет стоимости плановых технических обслуживаний и ремонтов одного базового вагона за период жизненного цикла	140
23	Таблица 5.5 – Расчет стоимости плановых технических обслуживаний и ремонтов одного нового вагона за период жизненного цикла	141
24	Таблица 5.6 – Основные экономические показатели базовых и новых электропоездов	147

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А – Определение вида законов распределения наработки рам тележек до отказа

1 Рамы тележек модификаций вагонов серии Е. Расчет выполнен методом моментов. Последовательность вычислений приведена в таблице А1.

Таблица А1 – Последовательность вычислений при выравнивании эмпирических данных законом распределения Вейбулла-Гнеденко $\varphi(x)=\beta\lambda x^{\beta-1}\exp(-\lambda x)^\beta$

Интервалы	x_i , 10^3 км	m_i , шт.	$m_i x_i$, км	$m_i (x_i)^2$, км	$\frac{x_i}{a}$	$a\varphi(x_i)$	$\varphi(x_i)$	m'_i , шт.	$\frac{(m_i - m'_i)^2}{m'_i}$
1	200	0	0	0	0,109	0,0468	$0,025 \cdot 10^{-6}$	2,90	2,90
2	400	18	$72 \cdot 10^5$	$288 \cdot 10^{10}$	0,218	0,1575	$0,086 \cdot 10^{-6}$	9,90	6,62
3	600	22	$132 \cdot 10^5$	$792 \cdot 10^{10}$	0,327	0,2778	$0,152 \cdot 10^{-6}$	17,48	1,16
4	800	35	$280 \cdot 10^5$	$2240 \cdot 10^{10}$	0,437	0,5379	$0,294 \cdot 10^{-6}$	33,80	0,04
5	1000	43	$430 \cdot 10^5$	$4300 \cdot 10^{10}$	0,546	0,7558	$0,413 \cdot 10^{-6}$	47,50	0,42
6	1200	57	$684 \cdot 10^5$	$8208 \cdot 10^{10}$	0,655	0,9594	$0,524 \cdot 10^{-6}$	60,20	0,17
7	1400	61	$854 \cdot 10^5$	$11956 \cdot 10^{10}$	0,765	1,0997	$0,601 \cdot 10^{-6}$	69,10	0,95
8	1600	64	$1024 \cdot 10^5$	$16384 \cdot 10^{10}$	0,874	1,1488	$0,627 \cdot 10^{-6}$	72,0	0,89
9	1800	71	$1278 \cdot 10^5$	$23004 \cdot 10^{10}$	0,983	1,0968	$0,599 \cdot 10^{-6}$	68,90	0,06
10	2000	69	$1380 \cdot 10^5$	$27600 \cdot 10^{10}$	1,093	0,9537	$0,521 \cdot 10^{-6}$	59,90	1,38
11	2200	58	$1276 \cdot 10^5$	$28072 \cdot 10^{10}$	1,202	0,7534	$0,411 \cdot 10^{-6}$	47,26	2,44
12	2400	34	$816 \cdot 10^5$	$19584 \cdot 10^{10}$	1,311	0,5394	$0,295 \cdot 10^{-6}$	33,92	0
13	2600	18	$468 \cdot 10^5$	$12168 \cdot 10^{10}$	1,420	0,3508	$0,191 \cdot 10^{-6}$	21,96	0,71
14	2800	16	$448 \cdot 10^5$	$12544 \cdot 10^{10}$	1,530	0,2075	$0,113 \cdot 10^{-6}$	12,99	0,69
15	3000	9	$270 \cdot 10^5$	$8100 \cdot 10^{10}$	1,639	0,1089	$0,059 \cdot 10^{-6}$	6,80	0,71
		575	$9412 \cdot 10^5$	$175240 \cdot 10^{10}$					19,14

Среднее значение наработки до отказа

$$\bar{x} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} = \frac{9412 \cdot 10^5}{575} = 1636,8 \cdot 10^3 \text{ км.}$$

Среднее квадратическое отклонение

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum m_i (x_i)^2}{\sum m_i} - (\bar{x})^2} = \sqrt{\frac{175240 \cdot 10^{10}}{575} - (1636,8 \cdot 10^3)^2} = 607,1 \cdot 10^3.$$

Определяем коэффициент вариации

$$v_x = \frac{S_x}{\bar{x}} = \frac{607,1 \cdot 10^3}{1636,8 \cdot 10^3} = 0,371.$$

Для $v_x = 0,371$ по таблице П2.3 [68] находим $\beta = 2,95$ и $\kappa_\beta = 0,8925$.

Вычисляем параметр a

$$a = \frac{\bar{x}}{\kappa_\beta} = \frac{1,636,8 \cdot 10^3}{0,8925} = 1,83 \cdot 10^6.$$

Находим значения $\frac{x_i}{a}$ и заполняем таблицу А1.

Теоретические значения частот m'_i определяем по формуле

$$m'_i = \sum m_i h \cdot \varphi(x_i) = 115 \cdot 10^6 \varphi(x_i),$$

где h – величина интервала разбиения пробега вагона.

Определяем число степеней свободы

$$v = K - C - 1,$$

где K – число интервалов разбиения наблюдаемого пробега, C – число параметров закона распределения. Тогда $v = 15 - 2 - 1 = 12$.

Для $v = 12$ и доверительной вероятности $0,05$ по таблице П2.2 [68] находим нормированную величину критерия Пирсона $\chi^2_{0,05} = 21,026$.

Проверка критерия согласия

$$\chi^2 = 19,14 < \chi^2_{0,05} = 21,026.$$

Таким образом, обоснована аппроксимация эмпирического распределения законом Вейбулла-Гнеденко со следующим видом функции плотности вероятности распределения наработки рам тележек вагонов серии Е до отказа

$$\varphi(x) = 2,95 \cdot 0,545 \cdot 10^{-6} x^{1,95} \exp(-0,545 \cdot 10^{-6} x)^{1,95}.$$

2 Рамы тележек вагонов серий 81-717, 81-714. Расчет выполнен методом моментов. Последовательность вычислений приведена в таблице А2.

Таблица А2 – Последовательность вычислений при выравнивании эмпирических данных

логарифмически-нормальным законом $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_{\lg x}} \exp\left[-\frac{(\lg x - \overline{\lg x})^2}{2S_{\lg x}^2}\right]$

Интервалы	x_i , 10 ³ км	m_i , шт.	$\lg x_i$	$m_i \lg x_i$	$m_i \lg^2 x_i$	t_i	$\varphi(t_i)$	$\varphi(x_i)$	m'_i	$\frac{(m_i - m'_i)^2}{m'_i}$
1	200	0	2,301	0	0	-3,33	0,0016	$0,016 \cdot 10^{-6}$	1,39	1,39
2	400	32	2,602	83,264	216,653	-1,89	0,0669	$0,347 \cdot 10^{-6}$	30,19	0,11
3	600	84	2,778	233,352	648,252	-1,05	0,2299	$0,796 \cdot 10^{-6}$	69,25	3,14
4	800	68	2,903	197,404	573,064	-0,45	0,3605	$0,936 \cdot 10^{-6}$	81,43	2,21
5	1000	67	3,0	201,0	603,0	0,01	0,3989	$0,829 \cdot 10^{-6}$	72,12	0,36
6	1200	48	3,079	147,792	455,052	0,39	0,3697	$0,640 \cdot 10^{-6}$	55,68	1,06
7	1400	34	3,146	106,964	336,509	0,71	0,3101	$0,460 \cdot 10^{-6}$	40,0	0,90
8	1600	33	3,204	105,732	338,765	0,99	0,2444	$0,317 \cdot 10^{-6}$	27,58	1,06
9	1800	24	3,255	78,120	254,280	1,23	0,1872	$0,216 \cdot 10^{-6}$	18,79	1,44
10	2000	17	3,301	56,117	185,242	1,45	0,1394	$0,145 \cdot 10^{-6}$	12,61	1,53
11	2200	13	3,342	43,446	145,196	1,64	0,1040	$0,098 \cdot 10^{-6}$	8,52	2,35
12	2400	9	3,380	30,420	102,819	1,83	0,0748	$0,065 \cdot 10^{-6}$	5,65	0,91
13	2600	6	3,415	20,490	69,973	1,99	0,0551	$0,044 \cdot 10^{-6}$	3,83	1,23
		435		1304,10	3928,81					17,69

Среднее значение случайной величины $\lg x_i$

$$\bar{y} = \overline{\lg x} = \frac{\sum m_i \lg x_i}{\sum m_i} = \frac{1304,1}{435} = 2,998.$$

Среднее квадратическое отклонение

$$S_y = S_{\lg x} = \sqrt{\frac{\sum m_i \lg^2 x_i}{\sum m_i} - (\overline{\lg x})^2} = \sqrt{\frac{3928,81}{435} - 2,998^2} = 0,209.$$

Центрирование эмпирических данных производим по формуле

$$t_i = \frac{\lg x_i - \overline{\lg x}}{S_{\lg x}} = \frac{\lg x_i - 2,998}{0,209}.$$

Значения $\varphi(x_i)$ вычисляем по формуле

$$\varphi(x_i) = \frac{0,4343}{x_i S_{\lg x}} \varphi(t_i) = 2,078 \frac{\varphi(t_i)}{x_i}.$$

Определяем теоретические частоты m'_i

$$m'_i = \sum m_i h \cdot \varphi(x_i) = 87 \cdot 10^6 \varphi(x_i),$$

Число степеней свободы $\nu = K - C - 1 = 13 - 2 - 1 = 10$.

Критерий $\chi^2_{0,05} = 18,307$, используя таблицу П2.2 [68].

Проверка критерия согласия

$$\chi^2 = 17,69 < \chi^2_{0,05} = 18,307.$$

Среднее значение наработки до отказа

$$\bar{x} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} = \frac{479600 \cdot 10^3}{435} = 1102,5 \cdot 10^3 \text{ км.}$$

Итак, функция плотности вероятности распределения наработки рам тележек вагонов серий 81-717/714 до отказа имеет вид

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,209x} \exp\left[-\frac{(\lg x - 2,998)^2}{2 \cdot 0,209^2}\right].$$

3 Рамы тележек вагонов серий 81-717.5/714.5 и модификаций. Расчет выполнен методом моментов. Последовательность вычислений приведена в таблице А3.

Таблица А3 – Последовательность вычислений при выравнивании эмпирических данных

логарифмически-нормальным законом $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_{\lg x} x} \exp\left[-\frac{(\lg x - \bar{\lg x})^2}{2S_{\lg x}^2}\right]$

Интервалы	x_i , 10^3 км	m_i , шт.	$\lg x_i$	$m_i \lg x_i$	$m_i \lg^2 x_i$	t_i	$\varphi(t_i)$	$\varphi(x_i)$	m'_i	$\frac{(m_i - m'_i)^2}{m'_i}$
1	150	0	2,176	0	0	-4,27	$6 \cdot 10^{-5}$	$1,11 \cdot 10^{-9}$	0,12	0,12
2	300	27	2,477	66,879	165,659	-2,34	0,0258	$0,239 \cdot 10^{-6}$	26,02	0,04
3	450	110	2,653	291,830	774,225	-1,22	0,1895	$1,171 \cdot 10^{-6}$	127,52	2,40
4	600	205	2,778	569,490	1582,040	-0,42	0,3653	$1,692 \cdot 10^{-6}$	184,26	2,33
5	750	151	2,875	434,125	1248,109	0,21	0,3902	$1,446 \cdot 10^{-6}$	157,47	0,26
6	900	105	2,950	309,750	913,760	0,68	0,3166	$0,978 \cdot 10^{-6}$	106,50	0,02
7	1050	69	3,021	208,449	629,724	1,14	0,2083	$0,551 \cdot 10^{-6}$	60,0	1,35
8	1200	29	3,079	89,291	274,927	1,51	0,1276	$0,295 \cdot 10^{-6}$	32,12	0,30
9	1350	18	3,130	56,340	176,344	1,84	0,0734	$0,151 \cdot 10^{-6}$	16,44	0,14
10	1500	12	3,176	38,112	121,043	2,13	0,0413	$0,076 \cdot 10^{-6}$	8,28	1,67
		726		2064,27	5885,83					8,63

Среднее значение случайной величины $\lg x_i$

$$\bar{y} = \bar{\lg x} = \frac{\sum m_i \lg x_i}{\sum m_i} = \frac{2064,27}{726} = 2,843.$$

Среднее квадратическое отклонение

$$S_y = S_{\lg x} = \sqrt{\frac{\sum m_i \lg^2 x_i}{\sum m_i} - (\overline{\lg x})^2} = \sqrt{\frac{5885,83}{726} - 2,843^2} = 0,156.$$

Центрирование эмпирических данных производим по формуле

$$t_i = \frac{\lg x_i - \overline{\lg x}}{S_{\lg x}} = \frac{\lg x_i - 2,843}{0,156}.$$

Значения $\varphi(x_i)$ вычисляем по формуле

$$\varphi(x_i) = \frac{0,4343}{x_i S_{\lg x}} \varphi(t_i) = 2,78 \frac{\varphi(t_i)}{x_i}.$$

Определяем теоретические частоты m'_i

$$m'_i = \sum m_i h \cdot \varphi(x_i) = 108,9 \cdot 10^6 \varphi(x_i),$$

Число степеней свободы $\nu = K - C - 1 = 10 - 2 - 1 = 7$.

Критерий $\chi^2_{0,05} = 14,067$, используя таблицу П2.2 [68].

Проверка критерия согласия

$$\chi^2 = 8,63 < \chi^2_{0,05} = 14,067.$$

Среднее значение наработки до отказа

$$\bar{x} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} = \frac{537893 \cdot 10^3}{726} = 740,9 \cdot 10^3 \text{ км}.$$

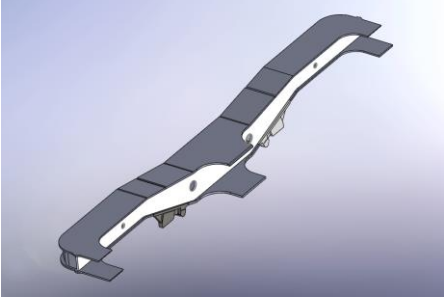
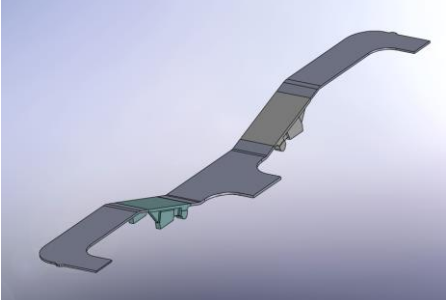
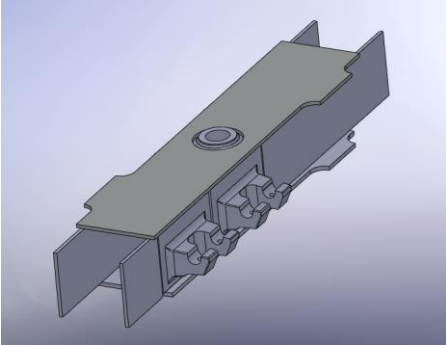
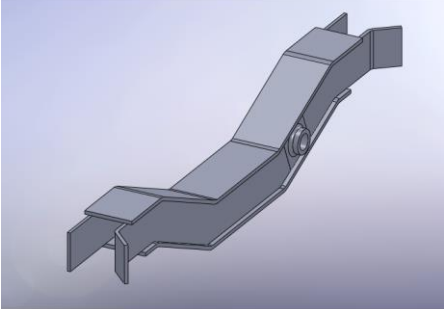
Итак, функция плотности вероятности распределения наработки рам тележек вагонов серий 81-717.5/714.5 до отказа имеет вид

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,156x} \exp\left[-\frac{(\lg x - 2,843)^2}{2 \cdot 0,156^2}\right].$$

Приложение Б – Основные узлы новой рамы тележки

В таблице Б1 представлены основные крупные узлы рамы тележки перспективных вагонов метрополитена моделей 81-760, 81-761.

Таблица Б1 – Основные крупные узлы новой рамы тележки

Изображение узла	Наименование	Обозначение (по чертежу)	Масса узла, кг	Кол-во на одну раму, штук
	Продольная балка	740.31.21.005	315	2
	Нижний лист продольной балки	740.31.21.012 (входит в узел 740.31.21.005)	111	2
	Центральная балка	7600.31.22.010	180	1
	Концевая балка	7600.31.23.010	89	2

Приложение В – Расчет новой конструкции рамы тележки

Ниже приведены основные материалы, поясняющие методику и результаты прочностного расчета для отдельных режимов нагружения новой конструкции рамы тележки.

Вертикальная статическая нагрузка на раму тележки. Нагрузка на одну пневматическую рессору составляет

$$Q_{стбр} = \frac{M_K \cdot a_y}{4} = \frac{44600 \cdot 9,8}{4} = 109\,270 \text{ Н},$$

где M_K – подрессоренная масса кузова, $M_K = 44600$ кг;

a_y - ускорение в вертикальном направлении равно, $a_y = 9,8$ м/с².

Вертикальная динамическая нагрузка, вызванная колебаниями масс вагона, определяется умножением силы тяжести брутто на расчётный коэффициент вертикальной динамики.

Вертикальная динамическая нагрузка от кузова

$$P_D = M_K \cdot g \cdot K_D = 44600 \cdot 9,8 \cdot 0,16 = 69\,932,8 \text{ Н},$$

где $K_D = \left(\frac{0,006}{f_{СТ}} + 0,007\right) \sqrt{V}$ – коэффициент динамической добавки, определяемый в соответствии с [62, п. 3.4.3.6].

ветствии с [62, п. 3.4.3.6].

$$K_D = \left(\frac{0,006}{0,226} + 0,007\right) \cdot \sqrt{\frac{90}{3,6}} = 0,16.$$

Ускорение в вертикальном направлении равно $a_y = 0,16 \cdot 9,8 = 1,57$ м/с².

Кососимметричная нагрузка задана перемещением осей колёс в вертикальном направлении $u_y = \pm 5$ мм.

Нагрузки от работы тягового привода. Определение расчётных моментов двигателя выполняется для двух расчетных режимов Па и Пб. Для режима Па по тягово-пусковой характеристике асинхронного двигателя для рабочего режима наибольший момент при максимальной загрузке $M_{ДВ. Па} = M_{НОМ} = 1\,680$ Н·м. Для режима Пб принимается расчётный режим трогания с места или дотормаживания с малой скорости до остановки. $M_{ДВ. Пб} = M_{ПУСК} = 3360$ Н·м – значение момента при пуске было принято по результатам испытаний.

Определяем опорные реакции на кронштейнах двигателя и редуктора от работы привода. Для определения реакции в кронштейне двигателя запишем уравнение моментов.

Для режима Па:

$$M_R = M_{ДВ. Па}$$

$$R_{ДВ. Па} = \frac{M_{НОМ}}{l_{ос}} = \frac{1680}{0,430} = 3\,907 \text{ Н}.$$

Для режима Пб: $M_R = M_{ДВ}^{Пб}$.

$$R_{ДВ}^{Пб} = \frac{M_{ПУСК}}{l_{дв}} = \frac{3360}{0,430} = 7\,814 \text{ Н.}$$

Определяем реакции на кронштейне редуктора от работы редуктора.

Для режима Па: $M_R = M_{ДВ}^{Па}$.

$$R_{РЕД}^{Па} = \frac{M_{НОМ} \cdot i \cdot \eta}{l_{ред}} = \frac{1680 \cdot 5,75 \cdot 0,96}{0,591} = 15\,691 \text{ Н.}$$

Для режима Пб: $M_R = M_{ДВ}^{Пб}$.

$$R_{РЕД}^{Пб} = \frac{M_{ПУСК} \cdot i \cdot \eta}{l_{ред}} = \frac{3360 \cdot 5,75 \cdot 0,96}{0,591} = 31\,382 \text{ Н.}$$

Вертикальные нагрузки от веса двигателя, веса редуктора и их инерционных масс.

Результаты ходовых испытаний показывают, что коэффициент перегрузки на двигателе не превышает 1,6. Тогда вертикальные инерционные силы от массы двигателя для режима Па

$$P_{ДВ.} = 1,6 \cdot g \cdot m_{ДВ} = 1,6 \cdot 9,8 \cdot 800 = 12544 \text{ Н.}$$

Определим опорные реакции в шарнирах кронштейнов двигателя от вертикальной силы инерции двигателя. На кронштейнах двигателя от его веса и инерционной силы возникают вертикальные реакции, которые определяются из уравнений равновесия

$$(m_{ДВ} \cdot g + P_{ДВ})l_3 = 2R_1^{ИНЕР} (l_3 + l_1),$$

где $l_1 = 0,478$ м – расстояние по горизонтали от оси двигателя до оси шарниров в кронштейнах центральной балки;

$l_3 = 0,777$ м – расстояние по горизонтали от оси двигателя до оси шарнира в тяге кронштейна концевой балки.

Режим Па: $(m_{ДВ} \cdot g + P_{ДВ})l_3 = 2R_1^{ИНЕР} (l_3 + l_1)$

$$R_1 = \frac{(m_{ДВ} \cdot g + P_{ДВ})l_3}{2(l_1 + l_3)} = \frac{(800 \cdot 9,8 + 12544) \cdot 0,777}{2(0,478 + 0,777)} = 6\,310 \text{ Н}$$

$$R_3 = m_{ДВ} \cdot g + P_{ДВ} - 2R_1 = 800 \cdot 9,8 + 12544 - 2 \cdot 6310 = 7\,764 \text{ Н.}$$

Для режима Пб пренебрегаем инерционной силой [62, таблица 3.15] и нагрузка на кронштейны определяется только весом двигателя. На кронштейнах двигателя от его веса возникают вертикальные реакции, которые определяются из уравнений равновесия

$$(m_{ДВ} \cdot g)l_3 = 2R_1^{ИНЕР} (l_3 + l_1)$$

$$R_1 = \frac{(m_{ДВ} \cdot g)l_3}{2(l_1 + l_3)} = \frac{(800 \cdot 9,8) \cdot 0,777}{2(0,478 + 0,777)} = 2\,427 \text{ Н.}$$

$$R_3 = m_{дв} \cdot g - 2R_1 = 800 \cdot 9,8 - 2 \cdot 2427 = 2 \ 986 \text{ Н.}$$

Определим вертикальные нагрузки от веса редуктора и динамической составляющей, возникающей при колебаниях привода при движении вагона. Для режима Па используем эмпирическую формулу согласно [64] для динамической составляющей, возникающей от колебаний привода при движении вагона с конструкционной скоростью v

$$P_{РЕД.}^{дин} = 540v - 3,5v^2, \quad \text{где } v = 25 \text{ м/с.}$$

Вертикальная динамическая нагрузка, приложенная к кронштейну редуктора

$$P_{РЕД.}^{дин} = 540 \cdot 25 - 3,5 \cdot 25^2 = 11 \ 312,5 \text{ Н.}$$

Таким образом, для режима Па имеем $Q_{РЕД.}^{Па} = P_{РЕД.}^{дин} = 11 \ 312,5 \text{ Н.}$

Для режима Пб динамическая добавка $P_{РЕД.}^{дин} = 0$.

На кронштейн редуктора приходится одна четверть веса редуктора, три четверти – на ось колесной пары, тогда вертикальная нагрузка на редукторный кронштейн от веса соответствующей части редуктора составит

$$Q_{РЕД.}^{Пб} = \frac{500 \cdot 9,8}{4} = 1 \ 225 \text{ Н.}$$

Нагрузка от продольных сил инерции кузова. На раму тележки действуют горизонтальная сила инерции половины кузова $0,5 P_{ИК}$ и инерция самой тележки $P_{ИТ}$, а также вертикальная сила $\Delta P_{ИК}$ (опрокидывающий момент $M_O = P_{ИК} \cdot h_K$ уравнивается парой сил $\Delta P_{ИК}$, которые догружают переднюю тележку вагона и разгружают заднюю).

Продольные силы инерции кузова и тележки прикладываются в их центрах масс и определяются для расчётного режима Па или Пб по формулам:

$$\text{для кузова: } P_{ИК} = F_{АК} \frac{M_K}{M_B};$$

$$\text{для тележки: } P_{ИТ} = F_{АТ} \frac{M_T^{ПП}}{M_B},$$

где M_K – масса кузова;

$M_T^{ПП}$ – приведённая масса тележки, учитывающая инерцию вращающихся частей путем увеличения массы тележки на 40 %:

$$M_T^{ПП} = 1,4 \cdot 7700 = 10 \ 780 \text{ кг;}$$

M_B – масса вагона (брутто);

$F_{АК}$ – продольное усилие для кузова при режимах движения Па и Пб принимается в соответствии с [62, п.3.4.5.1] равным 120 000 Н;

F_{AT} – для тележки это сила тяги и торможения, которая определяется:

- для режима Па – по диаграмме $F_T(v)$ при максимальной нагрузке вагона и номинальном напряжении сети (750 В);

- для режима Пб по полной реализации сцепления колес с рельсом (коэффициент сцепления $\mu = 0,25$).

Сила тяги вагона по сцеплению

$$F_{TB}^{CI} = \mu \cdot M_B \cdot g = 0,25 \cdot 60000 \cdot 9,8 = 147\,000 \text{ Н.}$$

Сила тяги, приходящаяся на тележку при режиме Пб

$$F_{AT}^{IIb} = 0,5 \cdot F_{TB}^{CI} = 0,5 \cdot 147000 = 73\,500 \text{ Н.}$$

Сила тяги вагона по максимальному моменту на двигателе в 2 раза меньше, чем при полной реализации сцепления колеса с рельсом (экспертные оценки характеристик двигателя)

$$F_{TB}^{DB} = 0,5 \cdot F_{TB}^{CI} = 0,5 \cdot 147000 = 73\,500 \text{ Н.}$$

Сила тяги, приходящаяся на тележку при режиме Па

$$F_{AT}^{IIa} = 0,5 \cdot F_{TB}^{DB} = 0,5 \cdot 73500 = 36\,750 \text{ Н.}$$

Продольные силы инерции кузова и тележки для режима Па:

$$\text{для кузова } P_{ИК} = F_{AK} \frac{M_K}{M_B} = 120000 \frac{44600}{60000} = 89\,200 \text{ Н;}$$

$$\text{для тележки } P_{ИТ} = F_{AT}^{IIa} \frac{M_T^{IP}}{M_B} = 36750 \frac{10780}{60000} = 6\,603 \text{ Н.}$$

Горизонтальная сила инерции, действующая на тележку при продольном ускорении

$$P_{прод}^{IIa} = \frac{P_{ИК}}{2} + P_{ИТ} = \frac{89200}{2} + 6603 = 51\,203 \text{ Н.}$$

Продольные силы инерции кузова и тележки для режима Пб:

$$\text{для кузова } P_{ИК} = F_{AK} \frac{M_K}{M_B} = 120000 \frac{44600}{60000} = 89\,200 \text{ Н;}$$

$$\text{для тележки } P_{ИТ} = F_{AT}^{IIb} \frac{M_T^{IP}}{M_B} = 73500 \frac{10780}{60000} = 13\,205,5 \text{ Н.}$$

Горизонтальная сила инерции, действующая на тележку при продольном ускорении

$$P_{прод}^{IIb} = \frac{P_{ИК}}{2} + P_{ИТ} = \frac{89200}{2} + 13205,5 = 57\,805,5 \text{ Н.}$$

Вертикальная составляющая, действующая на раму тележки от инерции кузова при продольном ускорении:

$$\Delta P_{ИК} = \frac{P_{ИК} \cdot h_K}{L},$$

где $P_{ИК}$ – сила инерции брутто кузова для режима Па или Пб;

h_K – высота центра тяжести брутто кузова от уровня опоры кузова на верхнюю плоскость пневморессоры;

L – база вагона.

$$\Delta P_{\text{ИК}}^{\text{Па}} = \Delta P_{\text{ИК}}^{\text{Пб}} = \frac{P_{\text{ИК}} \cdot h_K}{L} = \frac{89200 \cdot 0,958}{12,6} = 6\,782 \text{ Н.}$$

Боковая нагрузка от динамического вписывания в кривую. Определяются центробежной силой кузова и тележки, силой давления ветра и динамическим взаимодействием колес с рельсом в горизонтальной плоскости.

Нагружение центробежными силами от кузова и от тележки моделируется приложением непогашенного ускорения $a = 0,7 \text{ м/с}^2$.

$$C = \left(\frac{M_K}{2} + M_{\text{ТП}} \right) \times a = \left(\frac{44600}{2} + 4400 \right) \cdot 0,7 = 18\,690 \text{ Н.}$$

Сила давления ветра определяется из расчёта удельного давления ветра на боковую проекцию кузова (тележки), равного $w = 300 \text{ Н/м}^2$. Равнодействующая этой силы прикладывается к центру.

Равнодействующая силы ветра W_K , действующая на кузов

$$W_K = w \cdot S_k = 300 \cdot 53,9 = 16\,170 \text{ Н,}$$

где S_k – площадь боковой поверхности кузова, $S_k = 53,9 \text{ м}^2$.

Сила ветра, приходящаяся на тележку

$$W_T = \frac{W_K}{2} = 8\,085 \text{ Н.}$$

Полная боковая нагрузка на раму тележки при вписывании в кривую

$$C_{\text{БОК}} = C + W_T = 18690 + 8085 = 26\,775 \text{ Н.}$$

Однако, в конечно-элементной модели центробежные силы, действующие на кузов, рассчитываются автоматически при задании непогашенного центробежного ускорения $a_z = 0,7 \text{ м/с}^2$, поэтому в зонах опоры пневморессор необходимо приложить только ветровую нагрузку от кузова и тележки.

Теперь определим вертикальные нагрузки на пневморессоры от опрокидывающего момента. Так как боковая нагрузка на кузов приложена в центре масс кузова, то относительно уровня опор пневморессор создаётся опрокидывающий момент и, соответственно, вертикальные реакции на пневморессоры

$$\Delta P_{\text{СБОК}} = C_{\text{БОК}} \cdot h_K / c,$$

где c – расстояние между осями пневморессор.

$$\Delta P_{\text{СБОК}} = 26775 \cdot 0,958 / 1,88 = 13\,643 \text{ Н.}$$

В конечно-элементной модели центробежные силы, действующие на кузов, рассчитываются автоматически и соответствующие реакции на пневморессоры задавать не требуется.

Дополнительно к узлам конечно-элементной модели в вертикальном направлении необходимо приложить

$$\Delta P_{WT} = W_T \cdot h_K / c = 8085 \cdot 0,958 / 1,88 = 4\,120 \text{ Н.}$$

Определим усилия, действующие на тележку при взаимодействии колес с рельсами. При прохождении кривых участков пути тележка может занимать одно из следующих положений:

- хордовое (гребни обоих колес прижаты к наружному рельсу);
- промежуточное (только колесо передней колесной пары прижато гребнем к наружному рельсу);
- наибольшего перекоса (колесо передней колесной пары прижато гребнем к наружному рельсу, а колесо задней колесной пары прижато к внутреннему рельсу).

За расчётное положение при движении тележки в кривой радиусом 200 м принимается промежуточное положение. Принимаются следующие допущения:

- вертикальное давление от колес на рельсы одинаково для каждого колеса;
- все горизонтальные силы действуют в одной плоскости;
- оси колёсных пар перпендикулярны оси тележки, то есть конструкция тележки жёсткая.

Система уравнений равновесия тележки:

$$\begin{aligned} Z - 2F_{TP}(\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2) - C_{БОК} &= 0 \\ 2F_{TP}(-2l\cos\alpha_1 + b(\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2)) - C_{БОК} \cdot l &= 0' \end{aligned}$$

где $F_{TP} = \mu \frac{M_B \cdot g}{8} = 0,25 \frac{60000 \cdot 9,8}{8} = 18375 \text{ Н}$ – сила трения колеса о рельс;

Z – боковая сила на набегающем колесе;

$2l = p$ – база тележки;

$2b$ – расстояние между кругами катания;

a – искомое расстояние от полюса поворота до середины тележки;

α_1 и α_2 – углы между продольной осью тележки и радиусами-векторами из полюса поворота «О» в точки контакта колес с рельсами.

$$\begin{aligned} \cos\alpha_2 &= (a-l) / \sqrt{(b^2 + (a-l)^2)} \\ \cos\alpha_1 &= (a+l) / \sqrt{(b^2 + (a+l)^2)} \\ \sin\alpha_2 &= b / \sqrt{(b^2 + (a-l)^2)} \\ \sin\alpha_1 &= b / \sqrt{(b^2 + (a+l)^2)} \end{aligned}$$

Система уравнений для определения углов:

Решая систему уравнений, получим

$$a = 1,159 \text{ м; } \cos\alpha_1 = 0,943; \cos\alpha_2 = 0,105; \sin\alpha_1 = 0,333; \sin\alpha_2 = 0,994.$$

Подставив полученные результаты в систему уравнений равновесия тележки получаем

$$Z = 65\,958 \text{ Н.}$$

Нагрузки, действующие на переднюю колесную пару:

$$F_{TP1X} = F_{TP} \cdot \sin \alpha_1 = 1,809 \cdot 10^4 \cdot 0,333 = 6\,023 \text{ Н;}$$

$$F_{TP1Z} = F_{TP} \cdot \cos \alpha_1 = 1,809 \cdot 10^4 \cdot 0,943 = 17\,058 \text{ Н.}$$

Нагрузки для второй колесной пары:

$$F_{TP2X} = F_{TP} \cdot \sin \alpha_2 = 1,809 \cdot 10^4 \cdot 0,994 = 17\,981 \text{ Н;}$$

$$F_{TP2Z} = F_{TP} \cdot \cos \alpha_2 = 1,809 \cdot 10^4 \cdot 0,105 = 1\,899 \text{ Н.}$$

Рассчитаем нагрузки, действующие на буксовые опоры рамы тележки при вписывании в кривую.

Поперечная рамная сила от передней колесной пары

$$N_1 = Z - 2 F_{TP1Z} = 65958 - 2 \cdot 17058 = 31\,842 \text{ Н.}$$

Поперечная нагрузка от второй колесной пары

$$N_2 = 2 F_{TP2Z} = 2 \cdot 1899 = 3\,798 \text{ Н.}$$

Через каждую буксу передней оси передается поперечная нагрузка на раму

$$N_{1Б} = \frac{N_1}{2} = \frac{31842}{2} = 15\,921 \text{ Н.}$$

Через каждую буксу второй оси передается поперечная нагрузка на раму

$$N_{2Б} = \frac{N_2}{2} = F_{TP2Z} = 1\,899 \text{ Н.}$$

Продольная нагрузка на буксу от передней колесной пары

$$U_{1Б} = F_{TP1X} \frac{2b}{2b_p},$$

где $2b_p = 2,05 \text{ м}$ – расстояние между осями продольных балок рамы.

$$U_{1Б} = 6023 \frac{1,58}{2,05} = 4\,642 \text{ Н.}$$

Продольная нагрузка на буксу от второй колесной пары

$$U_{2Б} = F_{TP2X} \frac{2b}{2b_p} = 17981 \frac{1,58}{2,050} = 13\,858 \text{ Н.}$$