

На правах рукописи



Бельский Александр Олегович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ БОКОВОЙ РАМЫ
ДВУХОСНОЙ ТРЕХЭЛЕМЕНТНОЙ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Смолянинов Александр Васильевич.

Официальные оппоненты:

Петров Геннадий Иванович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство»;

Шевченко Денис Владимирович, кандидат технических наук, директор научно-исследовательской дирекции, общество с ограниченной ответственностью «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС).

Защита состоится «01» октября 2021 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 44.2.008.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. Б2-15 – зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тимухина Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из важнейших моментов, оказывающих влияние на развитие национальной Российской Федерации, является эффективное функционирование железнодорожного транспорта, которое в свою очередь зависит от безопасности движения железнодорожного транспорта. К ключевым условиям обеспечения безопасности движения относится надежная работа ходовых частей грузовых вагонов, в том числе боковых рам тележек.

В настоящее время более 87 % грузовых вагонов, эксплуатируемых на железных дорогах стран СНГ, оборудованы тележками модели 18-100 или их конструктивными аналогами. Опыт эксплуатации тележками модели 18-100 показывает, что её конструкция, несмотря на многочисленные модернизации, не в полной мере соответствует современным требованиям, предъявляемым к ходовым частям. Основным недостатком тележки модели 18-100 и её модификаций является несовершенство конструкции боковых рам, приводящее к большому количеству брака в ремонте и эксплуатации, нарушениям безопасности движения, в том числе крушениям поездов с высокой стоимостью устранения последствий. Создание новых конструкций боковых рам, модернизация существующих тесно связаны с исследованиями на прочность.

Таким образом, задачи по улучшению эксплуатационных свойств существующих конструкций боковых рам двухосной трехэлементной тележки грузового вагона, совершенствованию методик расчета являются актуальными и требуют поиска новых решений.

Цель и задачи. Цель настоящего диссертационного исследования заключается в улучшении эксплуатационных свойств конструкции боковой рамы двухосной трехэлементной тележки грузового вагона на основе разработки методики расчетной оценки напряженно-деформированного состояния, использующей современные универсальные программные комплексы инженерного анализа и учитывающей специфику эксплуатации боковой рамы при взаимодействии со смежными деталями тележки.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи.

1. Систематизация выполненных научных работ по вопросам совершенствования конструкций боковых рам двухосных трехэлементных тележек и определения их напряженно-деформированного состояния.

2. Разработка методики расчетной оценки напряженно-деформированного состояния конструкции боковой рамы методом конечных элементов, учитывающей специфику эксплуатации боковой рамы при взаимодействии со смежными деталями тележки по схемам нагружения, установленных «Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» и ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам».

3. Разработка конструкции боковой рамы двухосной трехэлементной тележки грузового вагона с улучшенными эксплуатационными свойствами по сравнению с типовой конструкцией.

4. Теоретическое и экспериментальное исследования напряженно-деформированного состояния разработанной конструкции боковой рамы.

5. Сопоставление значений напряжений и сроков служб, полученных на основе разработанной методики расчетной оценки напряженно-деформированного состояния, предложенной и серийной конструкций боковых рам.

Объект исследования – вагоны, в том числе боковая рама двухосной трехэлементной тележки грузового вагона.

Область исследования – эксплуатационные характеристики и параметры подвижного состава, повышение их эксплуатационной надежности и работоспособности.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработана методика расчетной оценки напряженно-деформированного состояния конструкции боковой рамы методом конечных элементов, учитывающая контактные взаимодействия боковой рамы с корпусами буксовых узлов по схемам нагружения, установленных «Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» и ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам».

2. Разработана конечно-элементная модель для определения напряженно-деформированного состояния боковой рамы с граничными условиями, отражающими контактное взаимодействие боковой рамы с корпусами буксовых узлов, реализованная в программном комплексе SOLIDWORKS.

3. Разработано встроенное в конструкцию боковой рамы техническое средство, создающее замкнутый контур буксового проема, защищенное патентами на изобретения.

4. Разработана методика определения рационального значения натяга, создаваемого предложенным техническим средством, между внутренней и наружной челюстями буксового проема, позволяющего повысить срок службы конструкции буксового проема боковой рамы за счет перераспределения напряжений в углах соответствующих буксовых проемов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Получены уточненные значения напряжений в элементах боковой рамы при действии нагрузок согласно «Норм для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» и ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам».

2. Разработаны два варианта встроенного в конструкцию боковой рамы технического средства, позволяющего повысить срок службы буксового проема за счет перераспределения напряжений в углах буксового проема, применяемого к конструкциям боковых рам, находящимся в эксплуатации, защищенного патентами на изобретения.

3. Разработаны методика и экспериментальный стенд для оценки напряженно-деформированного состояния боковой рамы.

4. Разработаны электрические структурная и принципиальная схемы прецизионных тензометрических измерительных преобразователей.

5. Получено рациональное значение натяга буксового проема, позволяющее за счет разработанного технического средства повысить срок службы конструкции буксового проема боковой рамы.

Методы исследования. В работе проводились теоретические исследования с использованием методов механики деформируемого твердого тела, требований нормативных документов к прочности и динамическим качествам подвижного состава железных дорог. Основной расчетный инструмент – метод конечных элементов с использованием лицензионного программного комплекса инженерного анализа SOLIDWORKS Simulation Solutions. Экспериментальные исследования выполнялись на разработанном стенде нагружения боковой рамы, снабженным тензометрическим оборудованием с применением прецизионных измерительных аналого-цифровых преобразователей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика расчетной оценки напряженно-деформированного состояния конструкции боковой рамы с граничными условиями, отражающими реальные условия эксплуатации боковой рамы.

2. Техническое средство, встраиваемое в конструкцию находящихся в эксплуатации боковых рам, позволяющее повысить срок службы буксовых проемов за счет перераспределения напряжений в их углах.

3. Методика исследования натяга, создаваемого предложенным техническим средством между внутренней и наружной челюстями буксового проема, позволяющая повысить срок службы конструкции буксового проема боковой рамы за счет перераспределения напряжений в соответствующих углах буксовых проемов.

Достоверность полученных результатов определяется верификацией разработанной методики расчетной оценки напряженно-деформированного состояния конструкции боковой рамы и верификацией разработанной конструкции боковой рамы на метрологически аттестованной аппаратуре с основной погрешностью, не превышающей 3,89 % и 3,87 % соответственно, отсутствием противоречий между полученными результатами и выводами в исследованиях, описанных в научной литературе, корректным использованием математического аппарата при построении моделей.

Апробация результатов. Материалы и основные результаты диссертационной работы обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (Омск, 2013), Всероссийской научно-технической конференции «Стандартизация, метрология и управление качеством», посвященной 90-летию Росстандарта и 170-летию метрологической службы России (Омск, 2015), на третьей Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава» (Омск, 2015), на Республиканской научно-технической конференции в Ташкентском институте инженеров железнодорожного транспорта АО «Ўзбекистонтемир йўллари» «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» (Ташкент, 2016), на XII Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» (Санкт-Петербург, 2017), на кафедре «Вагоны» ФГБОУ ВО УрГУПС (Екатеринбург, 2017), на XIII Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» (Санкт-Петербург, 2018), на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство» ФГБОУ ВО ОмГУПС (Омск, 2019), научной конференции, посвященной Дню Российской науки (Омск, 2020), на Всероссийской научно-технической конференции «ТРАНСПОРТ УРАЛА - 2020» (Екатеринбург, 2020).

Результаты диссертационной работы в полном объеме заслушаны и одобрены на заседании кафедры «Вагоны» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (Екатеринбург, 2021).

Публикации. Основные положения диссертационной работы и научные результаты опубликованы в 21 печатных работах, в том числе четыре статьи опубликованы в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций», два методических учебных пособия, два патента на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, состоящего из 140 наименований, и 8 приложений. Текст диссертации содержит 184 страницы, включает 75 рисунков и 20 таблиц.

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю, доктору технических наук, профессору А. В. Смольянинову за помощь, терпение и поддержку на завершающем этапе работы, благодарит кандидата технических наук, профессора Р. А. Ахмеджанова за замечания, обсуждения, рекомендации на всех этапах подготовки работы, а также компанию ООО «Энергосервис» за содействие в организации и проведении работ по верификации разработанных методик и конструкций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность темы исследования, степень её разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научная новизна, практическая значимость работы, методы исследования, выносимые на защиту положения, а также степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе диссертационной работы проведен анализ конструкций двухосных трехэлементных тележек, в том числе боковых рам, и направлений их совершенствования; выполнен обзор теоретических и экспериментальных исследований прочности конструкции боковой рамы.

Анализ конструкций двухосных трехэлементных тележек показывает, что с 2000-х годов в Российской Федерации начался рост количества разрабатываемых моделей тележек грузовых вагонов, обусловленный принятием программы по созданию подвижного состава нового поколения, нацеленной, в том числе, на повышение надежности, межремонтных пробегов, изменения выявленных недостатков в тележке модели 18-100. Большинство разработанных моделей тележек в основе повторяет конструктив и компоновку тележки модели 18-100. Разработаны несколько отличающиеся по конструктивным исполнениям тележки, подобные тележкам Barber и Motion Control, изготовленные с привлечением Американской Ассоциации Железных Дорог (AAR).

Все боковые рамы рассмотренных тележек имеют сходные конструкции, состоящие из горизонтальных, наклонных поясов и колонок. В средней части боковых рам имеется замкнутый проем для размещения рессорного комплекта, а по концевым частям, выполненным в П-образной форме, буксовые проемы для установки колесных пар с буксовыми узлами. П-образная конструкция испытывает, согласно положений курса сопротивления материалов, под действием тяговых и весовых нагрузок при движении состава, максимальные напряжения в местах сопряжения направляющих с опорной полкой проема, то есть углах буксового проема. Таким образом, наиболее слабым местом боковой рамы является её П-образный буксовый проем, что обусловлено его конструктивным исполнением.

Анализ работ, направленных на совершенствование конструкции боковой рамы, показывает, что снижение напряжения в углах буксовых проемов решается разнообразными конструктивными решениями, направленными на увеличение жесткости: изменения форм буксового проема и сечений элементов, углов наклона корпуса буксы, углов наклона опорной поверхности, ввод дополнительных элементов в конструкцию. Снижение напряжений в углах буксовых проемов боковых рам инновационных тележек достигается введением приливов, предназначенных для уменьшения плеч продольных поперечных усилий, действующих на челюсти буксового проема.

Не смотря на многообразие предложенных решений, последние не снижают радикально уровни напряжений в углах буксового проема. Становится очевидным потребность в разработке новых конструкций буксового проема, обеспечивающих улучшение эксплуатационных боковых рам.

Подтверждение корректности новых предложений, направленных на совершенствование конструкции боковых рам, проводится в первую очередь теоретическими исследованиями, позволяющими сократить временные и финансовые затраты. Значительный вклад в развитие методов исследования внесли следующие ученые: П. С. Анисимов, Р. А. Ахмеджанов, М. Ф. Вериго, А. С. Битюцкий, Ю. П. Бороненко, С. В. Вершинский, М. В. Винокуров, В. Н. Данилов, Е. Б. Дидова, А. В. Додонов, О. Б. Камаев, А. И. Кашкин, М. А. Короткевич, В. Н. Котуранов, В. В. Лукин, Н. Н. Невзорова, Н. Б. Манкевич, В. А. Николаев, Л. Н. Никольский, В. К. Окишев, А. М. Орлова, Г. И. Петров, Х. И. Пейрих, В. С. Плоткин, О. Н. Попов, В. А. Пранов, А. А. Рахмилевич, Я. О. Рузметов, К. А. Сафонцев, А. М. Соколов, А. В. Смольянинов, А. В. Третьяков, И. В. Тарминский, В. Я. Френкель, Р. М. Хаимов, Б. В. Харитонов, В. Д. Хусидов, В. Д. Цурекман, Ю. М. Черкашин, Л. А. Шадур, С. М. Шудрак, А. В. Якушев и многие другие.

В настоящее время для теоретических исследований конструкции боковой рамы на прочность используются различные методики на базе метод конечных элементов, реализованного в универсальных программных комплексах. При теоретических исследованиях конструкция боковой рамы рассматривается как отдельное нагруженное независимое тело, находящееся в пространстве, что не соответствует условиям её эксплуатации и может приводить к снижению точности определения напряженно-деформированного состояния конструкции в наиболее нагруженных зонах.

Вторая глава посвящена разработке методики расчетной оценки напряженно-деформированного состояния конструкции боковой рамы методом конечных элементов и теоретическому исследованию напряженно-деформированного состояния конструкции боковой рамы на основе разработанной методики расчетной оценки.

Разработанная методика расчетной оценки напряженно-деформированного состояния конструкции боковой рамы учитывает реальные условия эксплуатации боковой рамы по схемам нагружения, установленных «Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» (далее – «Нормах для расчета ...») и ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» (далее – ГОСТ «Вагоны грузовые ...»), для чего сформулированы и математически описаны граничные условия, вызванные спецификой взаимодействия боковой рамы в зоне буксовых проемов с буксовыми узлами. Граничные

условия в разработанной методике расчетной оценки выполнены с учетом контактного взаимодействия «буксовый проем боковой рамы – буксовый узел», перемещений буксовых узлов $\{\delta_1(x, y, z)\}^e$, $\{\delta_2(x, y, z)\}^e$.

$$\begin{cases} \{\sigma_0(x, y, z)\} = [D_0] \cdot [B_0] \cdot \{\delta_0(x, y, z)\}^e \\ \{\sigma_1(x, y, z)\} = [D_1] \cdot [B_1] \cdot \{\delta_1(x, y, z)\}^e, \\ \{\sigma_2(x, y, z)\} = [D_2] \cdot [B_2] \cdot \{\delta_2(x, y, z)\}^e \end{cases} \quad (1)$$

где $\{\sigma_0(x, y, z)\}$, $\{\delta_0(x, y, z)\}^e$ – матрицы-столбцы напряжений и перемещений конструкции боковой рамы, $\{\sigma_1(x, y, z)\}$, $\{\delta_1(x, y, z)\}^e$, $\{\sigma_2(x, y, z)\}$, $\{\delta_2(x, y, z)\}^e$ – матрицы-столбцы напряжений и перемещений буксовых узлов; $[D_0]$, $[D_1]$, $[D_2]$ – матрица упругости; $[B_0]$, $[B_1]$, $[B_2]$ – матрица деформации.

В разработанной методике расчетной оценки, представленной выражением (1), граничные условия представляют собой следующие:

- корпуса букс устанавливаются в соответствующие буксовые проемы боковой рамы на расстоянии равном базе тележки модели 18-100;

- корпуса букс имеют возможность поворачиваться относительно центральной и вертикальной осей и продольно перемещаться в буксовых проемах боковой рамы (рисунок 1, а). Величина перемещения равна сумме расстояний между взаимодействующими поверхностями боковой рамы и корпусов букс. Линейные и угловые перемещения для корпусов букс приняты независимыми друг от друга. Значение линейных и угловых перемещений для корпуса буксы, непоказанного на рисунке 1, приняты аналогичными;

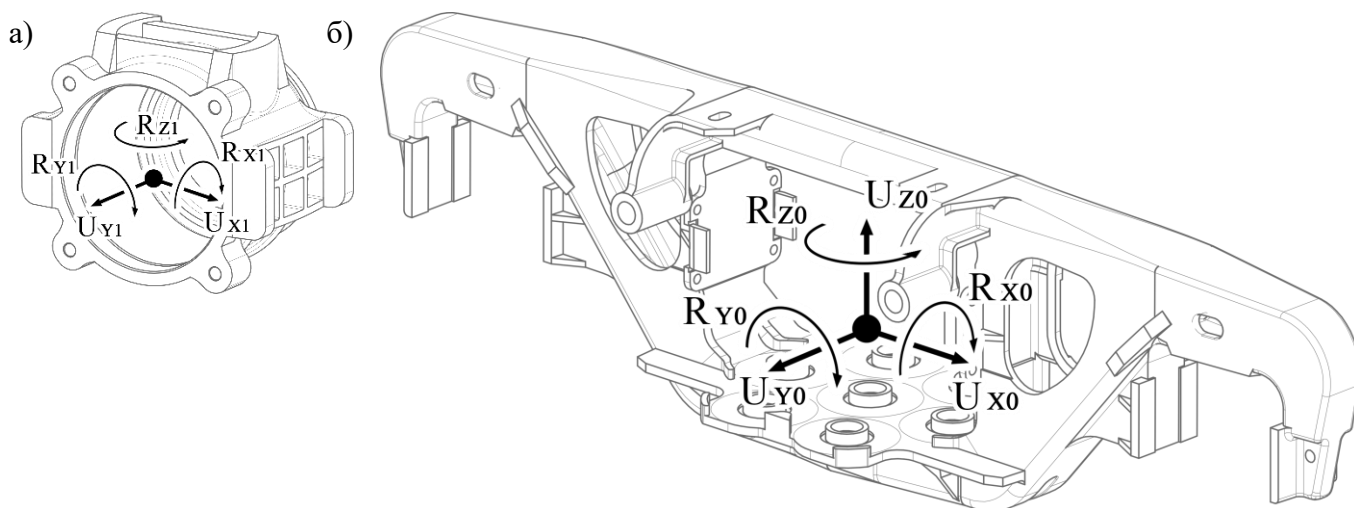
- между опорными поверхностями боковой рамы и соответствующими опорными поверхностями корпусов букс действуют силы трения;

- боковая рама свободно размещена на опорных поверхностях корпусов букс (рисунок 1, б).

Предложенные граничные условия позволяют без допущений описать координаты перемещения и поворотов боковой рамы в пространстве, что в полной мере соответствует условиям эксплуатации боковой рамы, то есть с учетом приведенных граничных условий моделируются её реальные движения в эксплуатации.

Алгоритм расчета предусматривает препроцессорную подготовку и постпроцессорную обработку. В препроцессорную подготовку входят создание пространственной геометрии деталей тележки; задание физико-механических свойств конструкционных материалов деталей тележки; прикладывание нагрузок к пространственной геометрии; определение кинематических связей деталей тележки и граничных условий; формирование конечно-элементной модели.

В пост процессорную обработку входит обработка показателей прочности и срока службы исследуемой детали. В случае получения неудовлетворительных показателей происходит возврат в препроцессорную подготовку.



а – для корпуса буксы; б – для боковой рамы

Рисунок 1 – К определению граничных условий

Пространственная геометрия конструкции деталей тележки создана по чертежам завода изготовителя. Модели конструкции боковой рамы и конструкций корпусов букс созданы отдельными и независимыми друг от друга. Конечно-элементная модель создана на основе геометрической модели в программном комплексе SOLIDWORKS Simulation Solutions, включает в себя три контактирующих тела, содержит 6 697 826 узлов и 4 484 092 десятиузловых тетраэдральных конечных элементов, 18 контактных пар типа «поверхность – поверхность».

По разработанной методике оценки с применением программного комплекса SOLIDWORKS Simulation Solutions получены напряженно-деформированные состояния конструкции боковой рамы для восьми расчетных режимов, установленных «Нормами для расчета ...» и ГОСТ «Вагоны грузовые ...». Результат оценки по каждому расчетному режиму представлен в виде соответствующей карты напряженно-деформированного состояния конструкции. Обобщенный анализ карт напряженно-деформированного состояния конструкции боковой рамы с применением разработанной методики расчетной оценки показывает, что значения напряжений в некоторых зонах буксовых проемов конструкции боковой рамы при теоретических исследованиях по расчетным схемам «Норм для расчета ...» по предложенной методике расчетной оценки увеличились до 9,89 %, при теоретических исследованиях по расчетным схемам ГОСТ «Вагоны грузовые ...» – до 9,79 %.

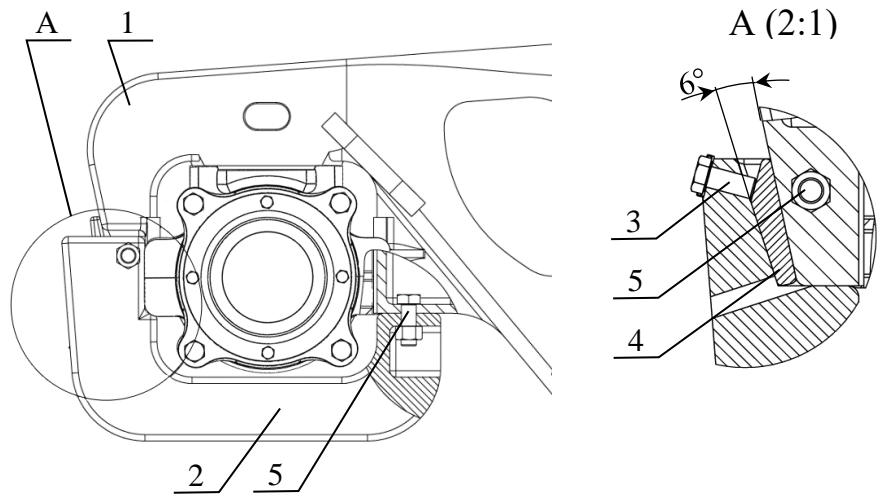
Третья глава посвящена разработке встроенного в конструкцию боковой рамы технического средства, направленного на улучшение её эксплуатационных свойств, а также теоретическому исследованию напряженно-деформированного состояния предложенной конструкции боковой рамы по схемам нагружения, установленных «Нормами для расчета ...» и ГОСТ «Вагоны грузовые ...», и сопоставлению значений

напряжений и сроков служб, полученных на основе разработанной методики расчетной оценки напряженно-деформированного состояния для предложенной и серийной конструкций боковых рам.

На основе анализа результатов работ, направленных на совершенствование конструкции боковых рам двухосных трехэлементных тележек, условий ремонта и эксплуатации конструкций боковых рам, целей и задач настоящей работы, сформулированы требования к разрабатываемому техническому средству. Главными среди которых являются: улучшение эксплуатационных характеристики конструкции боковой рамы, в первую очередь, элементов буксового проема; возможность его монтажа на всех стадиях жизненного цикла конструкции боковой рамы, включая изготовление, эксплуатацию и её ремонт; применение к существующим конструкциям боковых рам, находящимся в эксплуатации; выполнение заданных функции без создания помех для работы других деталей.

Разработаны два варианта технического средства, удовлетворяющие сформулированным требованиям, защищенные патентами на изобретение (патенты РФ № 2572442 и № 2577815). Выполнение требований при внедрении технического средства достигается за счет того, что в проемы буксовых узлов боковой рамы 1 (рисунок 2) добавлены подбуксовые скобы 2 с фиксаторами 3 и натяжителями 4. Фиксаторы и натяжители связаны с

наружными челюстями и подбуксовыми скобами, причем, каждый натяжитель выполнен в виде клина и размещен в наружной оконечности подбуксовой скобы, а фиксатор, введенный в зацепление с подбуксовой скобой, соединен с клином. Техническое средство крепится к конструкции боковой рамы при помощи болтовых соединений 5.



1 – боковая рама тележки модели; 2 – подбуксовая скоба;
3 – фиксатор; 4 – натяжитель; 5 – крепежные элементы

Рисунок 2 – Боковая рама, оборудованная
встроенным техническим средством

Для теоретического обоснования предложенной конструкции боковой рамы с применением разработанной методики, в последнюю внесены необходимые изменения: добавлены модели подбуксовых скоб и натяжителей, отверстия в конструкции

боковой рамы, предназначенные для крепления подбуксовых скоб, болтовые соединения, кинематические связи, обусловленные взаимодействием боковой рамы с подбуксовыми скобами; переопределены силы, действующие на модернизированную конструкцию боковой рамы по расчетным схемам «Норм для расчета ...» и ГОСТ «Вагоны грузовые ...». Выполнено сравнение сил, действующих на стандартную и модернизированную конструкцию боковой рамы. Показано, что внедрение данного средства не приводит к существенному изменению сил.

По разработанной методике оценки, адаптированной для исследования модернизированной конструкции боковой рамы, с применением программного комплекса SOLIDWORKS Simulation Solutions получены напряженно-деформированные состояния модернизированной конструкции боковой рамы для восьми расчетных режимов, установленных «Нормами для расчета ...» и ГОСТ «Вагоны грузовые ...». Результат оценки по каждому расчетному режиму представлен в виде соответствующей карты напряженно-деформированного состояния модернизированной конструкции.

Обобщенный анализ карт напряженно-деформированных состояний стандартной и модернизированной конструкции боковой рамы показывает, что напряжения во внутренних углах буксового проема уменьшаются на величину от 5 % до 22 % в зависимости от расчетного режима и буксового проема. Кроме того, в модернизированной конструкции боковой рамы существуют зоны с повышенными напряжениями относительно типовой конструкции боковой рамы. Изменения напряжений в углах буксового проема обуславливаются созданием жесткого замкнутого контура, что приводит к перераспределению напряжений в углах буксового проема – вместо двух углов в стандартной конструкции напряжения распределяются по четырем углам в модернизированной конструкции. Выполнена оценка влияния изменений напряжений на эксплуатационные характеристики боковой рамы, для чего исследованы и проанализированы сроки службы стандартной и модернизированной конструкции боковой рамы.

Сроки служб элементов конструкции боковой рамы определены из соответствующих расчетов на сопротивление усталости с применением программного модуля SOLIDWORKS Simulation Solutions. В качестве исходных данных для проведения расчетов на сопротивление усталости используются соответствующие результаты оценки напряженно-деформированного состояния конструкции боковой рамы. Получены результаты оценки по каждому установленному «Нормами для расчета ...» и ГОСТ «Вагоны грузовые ...» расчетному режиму для стандартной и модернизированной конструкции боковых рам в виде соответствующих карт сроков служб.

Обобщенный анализ карт сроков службы показывает следующие: применение подбуксовой скобы позволяет увеличить сроки службы в элементах буксового проема модернизированной конструкции боковой рамы по сравнению с типовой конструкцией боковой рамы; увеличенные значения напряжения в углах буксовых проемов не

приводят к снижению срока службы соответствующих элементов; места изготовления отверстий в боковой раме, предназначенные для крепления подбуксовых скоб, не приводят к снижению срока службы конструкции боковой рамы. Лимитирующим элементом при расчетных схемах по «Нормами для расчета ...» является внутренний буксовый угол буксового проема, где срок службы буксового проема увеличился на 9,39 % за счет снижения напряжений в этом элементе на 5,57 %. Лимитирующим элементом при расчетных схемах по ГОСТ «Вагоны грузовые ...» является внутренний буксовый угол, где срок службы буксового проема увеличился на 14,73 % за счет снижения напряжений в этом элементе на 9,86 %.

Четвертая глава посвящена верификации разработанных методик расчетной оценки и конструкции боковой рамы.

Верификации разработанной методики расчетной оценки напряженно-деформируемого состояния конструкции боковой рамы проводилась для подтверждения её корректности и возможности использовать при создании конструкции боковой рамы, обладающей улучшенными эксплуатационными свойствами по сравнению с типовой конструкцией. Верификация разработанной конструкции боковой рамы проводилась для подтверждения корректности результатов расчетов напряжений модернизированной конструкции боковой рамы, полученных с применением разработанной методики расчетной оценки напряженно-деформируемого состояния. Для проведения таких верификаций разработан и изготовлен экспериментальный стенд, разработана методика эксперимента.

Стенд представляет собой совокупность функционально связанных между собой механизмов, предназначенных для закрепления стандартной или модернизированной конструкций боковой рамы, создания и прикладывания нагрузок к конструкции боковой рамы по расчетным схемам, установленным «Нормами для расчета ...», измерения деформации с применением поверенных тензометрических датчиков с измерительного преобразователя.

Методика эксперимента включает в себя совокупность положений, определяющих постановку и последовательность выполнения экспериментальных исследований. Она содержит следующие основные этапы: условия проведения экспериментальных исследований; порядок выбора боковых рам и технических средств; порядок подготовки поверхностей для приклеивания тензорезисторов; порядок приклеивания тензорезисторов; программы экспериментов и последовательность их проведения; обработка и анализ полученных данных.

Сравнение значений погрешностей, полученных при верификации разработанной методики расчетной оценки напряженно-деформируемого состояния конструкции боковой рамы для усилий по I и III расчетным режимам «Норм для расчета ...»,

показывает, что расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями главных напряжений не превышает 3,87 %. На основании полученного значения относительной погрешности сделан вывод о корректности разработанной методики расчетной оценки напряженно-деформируемого состояния, о возможности её дальнейшего применения при разработке новой конструкции боковых рам, обладающих улучшенными эксплуатационными свойствами.

Сравнение значений погрешностей, полученных при верификации разработанной конструкции боковой рамы для усилий по I и III расчетным режимам «Норм для расчета...», показывает, что расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями главных напряжений не превышает 3,89 %. На основании полученного значения относительной погрешности сделан вывод о корректности разработанного технического средства.

По завершению каждой из верификаций проводились визуальный осмотр, геометрический обмер, неразрушающий контроль конструкций боковых рам, элементов технического средства, показавшие отсутствие в них деформаций и разрушений.

Пятая глава посвящена теоретическому обоснованию рациональной величины натяга буксового проема, создаваемого предложенным техническим средством.

При экспериментальных исследованиях было установлено, что значения напряжений в углах буксовых проемов зависят от величины натяга, создаваемого предложенным техническим средством между наружной и внутренней челюстями буксового проема.

Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния конструкции боковой рамы, выполненные для каждого расчетного режима по «Нормам для расчета ...» и ГОСТ «Вагоны грузовые ...» с учетом натяжений буксового проема, создаваемых приложением усилий от 0 до 100 кН с шагом 5 кН, подтвердили сделанные предположения и показали, что для каждого угла буксового проема в каждом расчетном режиме существует собственная отдельная зависимость напряжений от усилия натяга. В общем случае для четырех углов буксовых проемов конструкции боковой рамы можно получить 36 независимых друг от друга рациональных значений усилия натяга: по одному значению для каждого угла в каждом расчетном режиме, предусмотренным «Нормами для расчета ...» и ГОСТ «Вагоны грузовые ...», одно значение – для неподвижного груженого вагона. Так как места приложения нагрузок по расчетным схемам, предусмотренным «Нормами для расчета ...» и ГОСТ «Вагоны грузовые ...» зависят от направления движения и ускорения грузового вагона, то в каждом расчетном режиме может быть только одна рекомендуемая величина натяга буксового проема. Таким образом, число возможных рекомендуемых значений натяга сокращается до девяти, из которых необходимо определить два значения: одно для

соответствия требованиям «Норм для расчета ...», второе – для ГОСТ «Вагоны грузовые ...». При выборе рекомендуемой величины усилия натяга проверялось условие, что срок службы элементов конструкции боковой рамы с натяжением буксового узла должен быть не меньше срока службы соответствующих элементов конструкции боковой рамы без натяжения буксового узла.

Рекомендуемая величина натяга определена на основе обработки полученных теоретических зависимостей напряжений от усилия натяжений для каждого расчетного режима с использованием весовых коэффициентов по выражению

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1^0 \cdot \alpha_1 + \sigma_2^0 \cdot \alpha_2 + \sigma_3^0 \cdot \alpha_3 + \sigma_4^0 \cdot \alpha_4 \\ \dots \\ \sigma_1^i \cdot \alpha_1 + \sigma_2^i \cdot \alpha_2 + \sigma_3^i \cdot \alpha_3 + \sigma_4^i \cdot \alpha_4 \\ \sigma_1^i, \sigma_2^i, \sigma_3^i, \sigma_4^i \leq [\sigma]_j \end{array} \right\} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $\sigma_1^i, \sigma_2^i, \sigma_3^i, \sigma_4^i$ – максимальные значения напряжений соответственно в наружном углу первого буксового проема, внутреннем углу первого буксового проема, внутреннем углу второго буксового проема, наружном углу второго буксового проема при i -м расчетном режиме для усилия натяжения N ; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – коэффициенты веса напряжения элемента буксового проема в общем сроке службы конструкции боковой рамы; $[\sigma]_j$ – допускаемые напряжения для соответствующего расчетного режима по требованиям «Норм для расчета ...» и ГОСТ «Вагоны грузовые ...».

В результате проведенных исследований установлено, что: при расчетах по требованиям «Норм для расчета ...» приложение силы равной 2,77 кН, создающей натяг 0,036 мм, позволяет увеличить на 10,54 % срок службы модернизированной конструкции боковой рамы по сравнению с типовой; при расчетах по требованиям ГОСТ «Вагоны грузовые ...» – сила равная 2,85 кН, создающая натяг 0,036 мм, позволяет увеличить на 15,94 % срок службы модернизированной конструкции боковой рамы по сравнению с типовой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика расчетной оценки напряженно-деформированного состояния конструкции боковой рамы методом конечных элементов, учитывающая контактные взаимодействия элементов боковой рамы с корпусами буксовых узлов, которая в сочетании с известными схемами нагружения, установленными «Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» и ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам», позволяет получить уточненные значения напряжений в элементах конструкции боковой рамы.

Показано, что значения напряжений в некоторых зонах конструкции боковой рамы при теоретических исследованиях по требованиям «Нормами для расчета и

проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» при использовании предложенной методики расчетной оценки изменились до 9,89 %, по требованиям ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» – до 9,79 %.

Применение предложенной методики расчетной оценки позволяет повысить точность расчетов напряжений, выполнять расчеты срока службы по уточненным значениям напряжений. Разработанная методика применима к анализу напряженно-деформированного состояния различных моделей боковых рам двухосных трех-элементных тележек.

2. На уровне изобретений (патенты РФ № 2572442 и № 2577815) разработаны встроенные технические средства, направленные на совершенствование конструкции боковой рамы за счет создания замкнутого контура буксового проема, что обеспечивает при расчетных схемах по «Нормам для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» и ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» увеличение срока службы элементов буксового проема.

При теоретических исследованиях по требованиям «Норм для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» показано, что срок службы элементов буксового проема увеличен на 9,39 % за счет перераспределения усилий, приводящих к снижению напряжений в наиболее нагруженной зоне на 5,57 %. При теоретических исследованиях по требованиям ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» показано, что срок службы элементов буксового проема увеличен на 14,73 % за счет перераспределения усилий, приводящих к снижению напряжений в наиболее нагруженной зоне на 9,86 %.

3. Разработан стенд, предназначенный для измерения напряжений, возникающих при создании замкнутого контура буксового проема боковой рамы при расчетных схемах, соответствующих требованиям «Норм для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)».

4. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что напряжения в углах буксового проема боковой рамы и срок службы боковой рамы зависят от значения натяга между внутренней и наружной челюстями буксового проема, создаваемого разработанными встроенными техническими средствами. Определено рациональное значение натяга, равное 0,036 мм, создаваемое приложением усилий к наружным поверхностям наружных челюстей буксовых проемов с помощью встроенного технического средства.

При теоретических исследованиях по требованиям «Норм для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» применение разработанного технического средства совместно с рациональным натягом позволит перераспределить напряжения в углах буксовых проемов и увеличить срок службы буксового проема на 10,54 %. При теоретических исследованиях по требованиям «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» применение разработанного технического средства совместно с рациональным натягом позволит перераспределить напряжения в углах буксовых проемов и увеличить срок службы буксового проема на 15,94 %.

Выполненные исследования позволили предложить новые научно обоснованные технические средства и разработки в виде методики расчетной оценки для определения напряженно-деформированного состояния конструкции боковой рамы и способов повышения её срока службы, что имеет существенное значение при решении задач, направленных на повышение безопасности функционирования железнодорожного транспорта, предусмотренных «Стратегией развития железнодорожного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года». Для принятия решений о дальнейшей возможности внедрения разработанных технических средств на подвижном составе железных дорог необходимо провести полный спектр испытаний в соответствии с действующими нормативными документами.

Работы опубликованные по теме диссертации:

а) публикации в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций»:

1. Бельский, А. О. Расчет боковой рамы и надрессорной балки тележки грузового вагона методом конечных элементов / В. В. Лукин, А. О. Бельский // Известия Транссиба. – 2013. – № 1 (13). – С. 7 – 12.

2. Бельский, А. О. Анализ конструкции литой и сварной боковых рам трехэлементных тележек грузовых вагонов / А. О. Бельский // Известия Транссиба. – 2013. – № 2 (14). – С. 6 – 11.

3. Бельский, А. О. Научно-технические резервы повышения срока службы боковых рам двухосных трехэлементных тележек грузовых вагонов / А. О. Бельский, А. В. Смольянинов // Транспорт Урала. – 2020. – № 4 (67). – С. 45 – 49.

4. Бельский, А. О. Новые аспекты совершенствования конструкции двухосных тележек грузовых вагонов / А. О. Бельский, Р. А. Ахмеджанов, П. А. Варавва // Омский научный вестник. – 2020. – № 1 (169). – С. 22 – 26.

б) патенты на изобретение:

5. Патент 2572442 РФ, МПК В61F5/26, В61F5/52. Боковая рама тележки грузового вагона / Бельский А. О., Ахмеджанов Р. А., Горохов А. А. (РФ); заявитель и патентообладатель ООО «Энергосервис» (РФ). – № 2014129260/11; заявл. 15.07.14; опубл. 10.01.16, Бюл. № 1.

6. Патент 2577815 РФ, МПК В61F5/26, В61F5/52. Конструкция соединения буксового узла с рамой тележки грузового вагона / Бельский А. О., Ахмеджанов Р. А. (РФ); заявитель и патентообладатель ООО «Энергосервис» (РФ). – № 2014129261/11; заявл. 15.07.14; опубл. 10.02.16, Бюл. № 4.

в) публикации в журналах и научных сборниках:

7. Бельский, А. О. Расчет боковой рамы тележки грузового вагона методом конечных элементов / В. В. Лукин, А. О. Бельский // Совершенствование технологии ремонта и технического обслуживания вагонов: межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2009. – С. 60 – 64.

8. Бельский, А. О. Выбор программного комплекса для расчета боковой рамы тележки / Ю. И. Матяш, А. О. Бельский // Известия Транссиба. Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. – 2011. – № 1 (5). – С. 11 – 14.

9. Бельский, А. О. К вопросу автоматизации дефектоскопирования объектов железнодорожного транспорта / Р. А. Ахмеджанов, А. О. Бельский, Н. А. Соловьев и др. // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы всеросс. научн.-техн. конф. с межд. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 19 – 25.

10. Бельский, А. О. Об уточнении оценки напряженно-деформированного состояния боковой рамы тележки грузового вагона / Р. А. Ахмеджанов, А. О. Бельский // Совершенствование технологии ремонта и технического обслуживания вагонов: межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 20 – 26.

11. Бельский, А. О. Особенности применения литых и сварных боковых рам двухосных трехэлементных тележек грузовых вагонов в вагонном хозяйстве / Р. А. Ахмеджанов, А. О. Бельский // Вагонный парк. – 2015. – № 5-6 (98-99). – С. 4 – 8.

12. Бельский, А. О. Интеллектуальный тензометрический преобразователь с беспроводным интерфейсом и автономным питанием / Р. А. Ахмеджанов, А. О. Бельский, А. И. Щелканов и др. // Стандартизация, метрология и управление качеством: материалы всеросс. научн.-техн. конф., посвященной 90-летию Росстандарта и 170-летию метрологической службы России / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2015. – С. 161 – 165.

13. Бельский, А. О. Совершенствование конструкции боковой рамы двухосной трехэлементной тележки грузового вагона / Р. А. Ахмеджанов, А. О. Бельский // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы третьей всеросс. научн.-техн. конф. с международ. участием в трех частях / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – Ч. 3. – С. 54 – 61.

14. Бельский, А. О. Разработка беспроводного тензометрического датчика для экспериментальных работ по совершенствованию конструкции грузового вагона / Р. А. Ахмеджанов, А. О. Бельский, Е. А. Щелканова // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы третьей всеросс. научн.-техн. конф. с международ. участием в трех частях / Омский гос. ун-т путей сообщений. – Омск, 2015. – Ч. 3. – С. 88 – 93.

15. Бельский, А. О. Ресурсосбережение при совершенствовании конструкции боковой рамы двухосной трехэлементной тележки / Р. А. Ахмеджанов, А. О. Бельский // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: материалы республик. научн.-техн. конф. / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. тр-та. – Ташкент, 2016. – С. 37 – 40.

16. Бельский, А. О. О путях снижения напряжений в углах буксового проема боковых рам двухосных трёхэлементных тележек грузовых вагонов // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XII международ. научн.-техн. конф. / Петербур. гос. ун-т путей сообщения. – СПб., 2017. – С. 58 – 60.

17. Бельский, А. О. О совершенствовании соединения буксовых узлов с боковыми рамами тележек грузовых вагонов / Р. А. Ахмеджанов, А. О. Бельский // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XIII международ. научн.-техн. конф. / Петербур. гос. ун-т путей сообщения. – СПб., 2018. – С. 10 – 12.

18. Бельский, А. О. Повышение срока службы литых боковых рам двухосных трехэлементных тележек грузовых вагонов / Р. А. Ахмеджанов, А. О. Бельский // Транспорт: наука, образование, производство: сб. науч. тр. / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов н/Д., 2019. – С. 243 – 247.

19. Бельский, А. О. Современное состояния и новые тенденции развития конструкции тележек грузовых вагонов / А. О. Бельский, П. А. Варавва, Р. А. Ахмеджанов // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы научн. конф., посвященной Дню Российской науки / Омский гос. ун-т путей сообщений. – Омск, 2020. – С. 116 – 121.

г) методические учебные пособия:

20. Бельский, А. О. Конструктивные особенности двухосных трехэлементных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм: учеб. пособие / Р. А. Ахмеджанов, А. О. Бельский. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2015. – 131 с.

21. Бельский, А. О. Конструктивные особенности двухосных трехэлементных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм: учеб. пособие / Р. А. Ахмеджанов, А. О. Бельский. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – 167 с.

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Личный вклад автора в работах [1 – 19], опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: разработка методики расчетной оценки напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов, учитывающей контактные взаимодействия боковой рамы с корпусами буксовых узлов по схемам нагружения, установленных ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» и «Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)»; разработка конструкции боковой рамы двухосной трехэлементной тележки грузового вагона, обладающей улучшенными эксплуатационными свойствами по сравнению с типовой конструкцией; проектирование механической части экспериментального стенда, применяемого в диссертационной работе для исследования напряженно-деформированного состояния элементов буксового проема существующей и разработанной конструкций боковой рамы, в целях верификации результатов теоретических исследований. Личный вклад автора в работах [20, 21], опубликованных в соавторстве, заключается в техническом описании и анализе конструктивных особенностей двухосных трехэлементных тележек, разработанных в государствах - участниках Содружества Независимых Государств, находящихся на разных стадиях жизненного цикла.

Бельский Александр Олегович

**Совершенствование конструкции боковой рамы
двухосной трехэлементной тележки грузового вагона**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация
(технические науки)

Подписано в печать 24.06.2021. Формат 60 x 84/16.

Усл. печ. л. 1,2. Тираж 100 экз. Заказ 26.

УрГУПС

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66