

## НОВЫЕ АСПЕКТЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ДВУХОСНЫХ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

**Проведен анализ технического состояния литых боковых рам двухосных трехэлементных тележек грузовых вагонов в процессе эксплуатации. Предложены уточненный способ расчета на прочность несущей конструкции боковой рамы, новые аспекты конструктивных решений, позволившие повысить прочность несущей конструкции боковой рамы при эксплуатации.**

**Ключевые слова:** тележка грузового вагона, боковая рама, анализ, расчет, прочность, срок службы, метод конечных элементов, модернизация.

Одной из основных стратегических целей ОАО «РЖД» в соответствии с долгосрочной программой развития и комплексной программой инновационного развития является обеспечение необходимого уровня безопасности движения и экологической безопасности [1, 2]. Достижение данной цели возможно за счет расширения научно-технической кооперации Холдинга с ведущими российскими и зарубежными научными и инженеринговыми центрами в области проектирования и производства железнодорожной техники, модернизации подвижного состава. В вагонном хозяйстве ключевым фактором, оказывающим влияние на выполнение стратегических целей ОАО «РЖД», является безопасность и надежность двухосных трехэлементных тележек грузовых вагонов.

Брак с крупным вагонным литьем приобрел массовый характер. Каждый год, согласно данным НП ОЖДПС, в стране по различным дефектам бракуется более 100 тыс. боковых рам и надрессорных балок [3].

Возникновение трещин, являющихся причиной браковки боковых рам и надрессорных балок, происходит из-за имеющих в конструкции тележки недостатков, в т. ч. недостаточной связанности элементов тележки, наличия зазоров и узлов сухого трения, приводящих к повышенным динамическим нагрузкам на раму [4]. Стоимость новой боковой рамы постоянно увеличивается и в настоящее время уже достигала 170 тыс. руб. Основной причиной роста цен на детали крупного вагонного литья является постоянное наличие спроса как на новый подвижной состав, так и на отдельные детали. Также в стране ежегодно происходят сходы подвижного состава по причине излома боковой рамы. Устранение последствий, вызванных изломом боковой рамы, требует уже десятки миллионов рублей для восстановления инфраструктуры, под-

вижного состава, предотвращения экологических проблем.

ОАО «РЖД» в сотрудничестве с ведущими научными, конструкторскими и производственными организациями постоянно разрабатывают и внедряют меры противодействия браку и устранению конструктивных недостатков литых деталей. Так, для увеличения достоверности результатов неразрушающего контроля литых деталей феррозондовый метод контроля был заменен на магнитопорошковый, исключены применения акустико-эмиссионного контроля, внедряются комплексы оборудования для контроля разрушения литых деталей в составе поезда на ходу. Для устранения недостатков вагонного литья совершенствуются методики расчета, разрабатываются новые конструкции и модернизируются существующие [5–7]. Эти работы приносят свои положительные результаты. Но существующие проблемы с обеспечением качества и срока службы боковых рам требуют поиска и внедрения новых решений.

Для решения задачи по повышению прочности и срока службы литых деталей необходимо разработать математическую модель, позволяющую более точно определять прочность и срок службы литых деталей и, в первую очередь, боковых рам тележек грузовых вагонов.

На основе предложенной модели провести анализ и оптимизацию основных элементов несущей конструкции боковой рамы.

Расчет на прочность несущей конструкции боковой рамы осуществляется в соответствии с «Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) с изменениями и дополнениями» (далее «Нормы...») и ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» (далее «ГОСТ...») [8, 9].

В соответствии с «Нормами...» прочность несущей конструкции боковой рамы определяют при действии сил в расчетных режимах I, III. Расчетному режиму I соответствуют силы, возникающие при трогании состава повышенной массы и длины с места и его осаживании, при производстве маневровых работ и соударении вагонов, при экстренном торможении в поездах, движущихся с малыми скоростями. Расчетному режиму III соответствуют силы, возникающие в условиях эксплуатации при движении вагона в составе поезда по прямым и кривым участкам пути и стрелочным переводам с допускаемой скоростью вплоть до конструкционной при периодических служебных торможениях, периодических умеренных (при незначительном изменении ускорений) рывках и толчках, нормальной работе механизмов и узлов грузовых вагонов.

В соответствии с «ГОСТ...» прочность несущей конструкции боковой рамы определяют при действии сил в режимах Ia, Ib, Iv, III. Режиму Ia соответствует сочетание сил, действующих на тележку при соударении вагона при роспуске с сортировочной горки, режиму Ib — при проходе вагонного замедлителя при роспуске вагона с сортировочной горки, режиму Iv — при торможении состава, движущегося в кривом участке пути, режиму III — для сопротивления усталости ее несущей конструкции. Действующие на несущую конструкцию тележки вертикальные и боковые силы должны быть уравновешены реакциями в опорах тележки на подшипниковые узлы колесных пар, зависящими от кон-

структивного устройства опор. Силы, действующие на составные части тележки, определяют из условия статического равновесия с учетом устройства их соединения.

Местные напряжения, вызываемые внешней нагрузкой в несущей конструкции боковой рамы, определяют методом конечных элементов с применением трехмерных моделей, составленной из объемных конечных элементов, с учетом макрогеометрии и геометрических концентраторов напряжений конструкции, упругого деформирования материала.

Современные программные комплексы, применяемые для расчета на прочность конструкций методом конечных элементов, облегчают и ускоряют работу за счет комплексной автоматизации процесса расчета.

В общем случае метод расчета на прочность представляет собой совокупность последовательно выполняемых этапов, а именно, дискретизация конструкции, построение глобальной матрицы жесткости и вектора узловых сил, учет заданных граничных условий, решение системы разрешающих уравнений, определение внутренних усилий (напряжений). Схема алгоритма расчета на прочность методом конечных элементов представлена на рис. 1 и применима как для традиционных моделей расчета, так и для вновь разрабатываемой.

В общем случае работу алгоритма можно описать следующим образом:

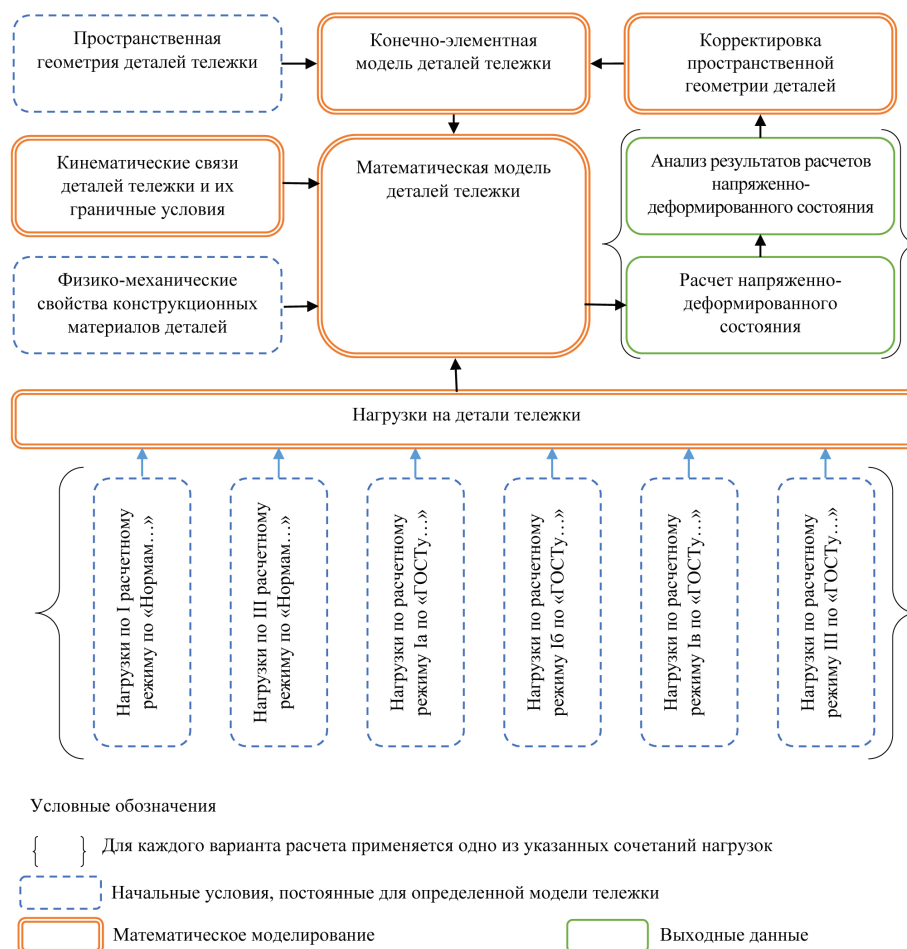


Рис. 1. Алгоритм расчета боковой рамы на прочность с применением метода конечных элементов

1. По исходным данным создают пространственную геометрию детали тележки.
2. Задаются физико-механические свойства конструкционных материалов детали тележки.
3. Определяются нагрузки и прикладываются к пространственной геометрии.
4. Определяются кинематические связи деталей тележки и граничные условия, прикладываются к пространственной геометрии.
5. Формируется конечно-элементная модель.
6. Конечно-элементная модель используется для оценки показателей прочности и срока службы исследуемой детали тележки.
7. В случае получения на этапе 6 неудовлетворительных значений показателей прочности и срока службы конструктором вносятся изменения в конструкцию исследуемой литой детали (этап 1), изменяется материал (этап 2), определяются нагрузки (этап 3) и кинематические связи и граничные условия (этап 4). Формируют новую конечно-элементную модель с учетом выполненных изменений (этап 5), проводят повторную оценку показателей прочности и срока службы исследуемой детали тележки.
8. Этап 7 повторяют (при необходимости) до получения удовлетворения требований к показателям прочности и срока службы исследуемой детали.

Этапы 1–4 относятся к начальным условиям и являются постоянными для определенной модели тележки. Если создание пространственной геометрии детали тележки выполняется по конструкторской документации разработчика соответствующей детали, а физико-механические свойства с нагрузками и местами их приложения определяются в соответствии с требованиями нормативных документов [8, 9], то кинематические связи деталей тележки и их граничные условия определяются только опытом и знанием, имеющимися у исследователя.

В традиционных моделях боковая рама рассматривается как независимое неподвижное тело в пространстве, но в эксплуатации боковая рама с учетом имеющихся зазоров между деталями тележки, ограничений, вызванных взаимодействием между деталями тележки, имеет шестую степень свободы, т.е. находится в свободном состоянии. Такие допущения при задании граничных условий могут приводить к проектированию боковой рамы с необоснованно высокой массой или ошибочным оценкам срока службы.

В основе предлагаемого нового алгоритма лежит анализ работы деформируемых деталей тележки вагона при задании расчетных воздействий не непосредственно на отдельную исследуемую деталь (как принято в традиционных расчетных моделях), а на систему «боковая рама — корпуса буксовых узлов». Система позволяет учитывать не только механические связи между взаимодействующими деталями, но и контактные пары (рис. 2). Такой подход позволяет получать расчетные схемы (систему самоуравновешенных нагрузок, действующих на элемент конструкции) и результаты расчетного анализа, не прибегая при этом к существенным упрощениям в способах нагружения и закрепления отдельной детали.

Сравнение граничных условий, применяемых в традиционных моделях, и предлагаемой приведено в табл. 1, где  $U_x, U_y, U_z$  — перемещения по осям  $X, Y, Z$  соответственно (рис. 2);  $R_x, R_y, R_z$  — повороты вокруг осей  $X, Y, Z$  соответственно (рис. 2).

Контактные пары в разработанной математической модели заданы для следующих пар:

- 1, 10 — опорные поверхности буксового узла боковой рамы с соответствующими опорными поверхностями корпусов букс;
- 2, 4, 6, 8 — вертикальные поверхности челюстей буксового проема боковой с соответствующими вертикальными поверхностями корпусов букс;
- 3, 5, 7, 9 — продольные вертикальные поверхности челюстей буксового проема боковой с соответствующими продольными вертикальными поверхностями корпусов букс.

Предлагаемый авторами алгоритм расчета позволяет на этапе проектирования получить максимально приближенные значения внутренних напряжений в элементах конструкции за счет моделирования граничных условий, соответствующих реальным условиям эксплуатации боковых рам. Так, значения главных напряжений во внутреннем и наружном углах буксового проема типовой конструкции, полученные с применением новой модели для I расчетного режима по «Нормам...», равны 143,20 МПа и 281,75 МПа соответственно. По традиционной модели расчета в аналогичных элементах главные напряжения равны 136,55 МПа и 262,23 МПа [10]. Сравнивая поэлементно главные напряжения, полученные по предлагаемой и традиционной расчетной модели, можно сделать вывод,

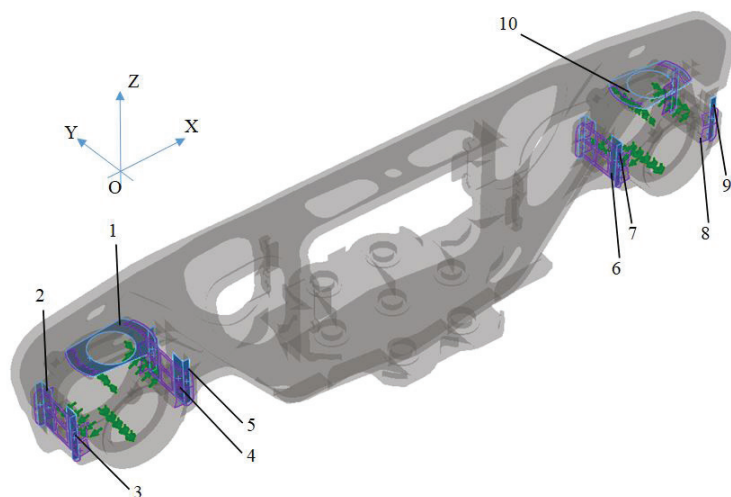


Рис. 2. Контактные пары в разработанной математической модели

Граничные условия, применяемые в традиционных моделях и предлагаемой

№ п/п	Деталь	Традиционная модель	Предлагаемая модель
1	Боковая рама	$\begin{cases} U_x = U_y = U_z = 0 \\ R_x = R_z = 0 \\ R_z = 2\pi \end{cases}$	$\begin{cases} U_{x1} = U_{x2} \\ U_{y1} = U_{y2} \\ U_{z1} = U_{z2} \\ R_{x1} = R_{y1} = R_{z1} = R_{x2} \end{cases}$
2	Корпус буксы	Неприменимо	$\begin{cases} U_{x2} = 20 \text{ мм} \\ U_{y2} = 11 \text{ мм} \\ U_{z2} = 0 \text{ мм} \\ R_{x2} = R_{y2} = R_{z2} = 2\pi \end{cases}$

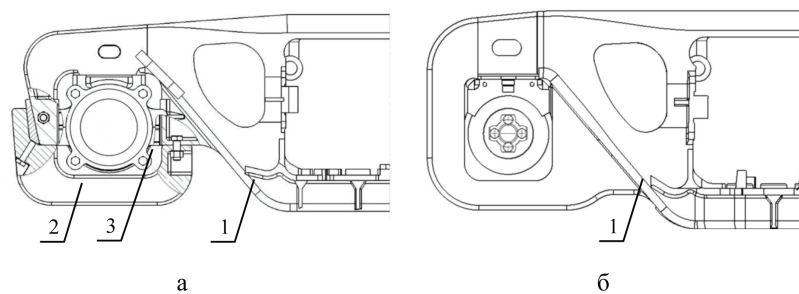


Рис. 3. Варианты модернизации конструкции боковой рамы:

- а — вариант боковой рамы с подбуксовыми скобами;  
 б — вариант боковой рамы с замкнутым буксовым узлом;  
 1 — боковая рама, 2 — подбуксовая скоба, 3 — крепежные элементы

что значения главных напряжений увеличились на величину до 10 %.

С применением предлагаемого алгоритма расчета авторами на уровне изобретений разработаны два варианта модернизации конструкции боковой рамы (рис. 3), обеспечивающие замыкание контура буксового проема, перераспределяющие нагрузки по четырем его углам и, тем самым, снижающие напряжения и вероятность дефектообразования в них, а также показано, что в углах буксового проема боковой рамы достигнуто по I расчетному режиму, предусмотренному «Нормами...», снижение напряжений до 33 % и по III расчетному режиму — до 22 % [11, 12].

Расчетные значения по снижению напряжений были подтверждены экспериментально с погрешностью не более 10 % исследованиями на созданном стенде, снабженном прецизионными тензотрическими преобразователями с программируемой структурой [13].

Вариант модернизации боковых рам с учетом постановки подбуксовых скоб возможно выполнять вагоноремонтными компаниями во время плановых видов вагонов собственными силами в существующих условиях. Вариант боковой рамы с замкнутыми буксовыми проемами возможен при её изготовлении на вагоностроительных заводах.

Полученные математическая модель и варианты конструктивного исполнения боковой рамы могут применяться для создания тележек грузовых вагонов новых конструкций, модернизации существующих тележек, а также для возможного пересмотра показателей прочности и долговечности литых де-

талей тележек грузовых вагонов, эксплуатируемых на железных дорогах. Данная работа посвящена рассмотрению вопросов, касающихся боковых рам, но аналогичные вопросы требуется рассматривать и для наддресорной балки.

#### Библиографический список

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р. М., 2016. 135 с.
2. Комплексная программа инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2020 года. URL: <http://www.rzd.ru> (дата обращения: 01.11.2019).
3. Вагоноремонт: не удешевлять, а оптимизировать. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/vagonoremont-ne-udeshevlyat-a-optimizirovat/> (дата обращения: 01.11.2019).
4. Галиев И. И., Николаев В. А., Сергеев Б. Б. [и др.]. Причины нарушения безопасности движения грузовых вагонов в эксплуатации // Известия Транссиба. 2013. № 3 (15). С. 133–141.
5. Лагерева И. А. Оценка усталостной прочности и живучести боковой рамы литой тележки грузового вагона // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2017. № 4. С. 374–379. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-04-374-380.
6. Расщепкина Д. В., Якушев А. В. Работоспособность боковых рам тележек грузовых вагонов после возникновения опасного отказа // Транспорт Урала. 2018. № 3 (58). С. 30–34.
7. Ахмеджанов Р. А., Бельский А. О. Конструктивные особенности двухосных трехэлементных тележек грузо-

вых вагонов колеи 1520 мм. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2015. 131 с.

8. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) с изменениями и дополнениями. М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 319 с.

9. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Введ. 2016–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 56 с.

10. Ахмеджанов Р. А., Бельский А. О. Ресурсосбережение при совершенствовании конструкции боковой рамы двухосной трехэлементной тележки // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: материалы Республ. науч.-техн. конф. Ташкент: Изд-во ТашИИТ, 2016. С. 37–40.

11. Пат. 2572442 Российская Федерация, МПК В 61 F 5/30. Боковая рама тележки грузового вагона / Ахмеджанов Р. А., Бельский А. О., Горохов А. А. № 2014129260; заявл. 15.07.14; опубл. 09.12.15. Бюл. № 1.

12. Пат. 2577815 Российская Федерация, МПК В 61 F 5/30. Конструкция соединения буксового узла с рамой тележки грузового вагона / Ахмеджанов Р. А., Бельский А. О. № 2014129261; заявл. 15.07.14; опубл. 17.02.16. Бюл. № 8.

13. Ахмеджанов Р. А., Бельский А. О., Щелканова Е. А. Разработка беспроводного тензометрического датчика для экспериментальных работ по совершенствованию конструкции грузового вагона // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного

подвижного состава: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. В 3 ч. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2015. Ч. 3. С. 88–93.

**БЕЛЬСКИЙ Александр Олегович**, начальник технического отдела ООО «Энергосервис», г. Омск.

**АХМЕДЖАНОВ Равиль Абдрахманович**, кандидат технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

AuthorID (РИНЦ): 533818

**ВАРАВВА Павел Андреевич**, аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ОмГУПС.

Адрес для переписки: mail-n@bk.ru

#### Для цитирования

Бельский А. О., Ахмеджанов Р. А., Варавва П. А. Фазовый преобразователь перемещений // Омский научный вестник. 2020. № 1 (169). С. 22–26. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-22-26.

Статья поступила в редакцию 12.11.2019 г.

© А. О. Бельский, Р. А. Ахмеджанов, П. А. Варавва