

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО УрГУПС)

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе,
к.т.н., доцент

С. В. Бушуев

2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» на диссертацию Мустафаева Юрия Кямаловича «Динамика ходовых частей вагона с учётом гироскопических свойств колёсных пар», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки)

Актуальность темы исследования.

Современные требования к развитию железнодорожной отрасли диктуют необходимость повышения провозной и пропускной способности существующих участков железных дорог, что невозможно без повышения скоростей движения поездов. В «Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга)» ставится задача повышения эксплуатационных скоростей движения, отмечается необходимость исследований, связанных с изучением взаимодействия железнодорожных экипажей и объектов инфраструктуры при реализации скоростного и высокоскоростного движения. В «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» также планируется вывод грузового железнодорожного сообщения на новый уровень за счёт повышения максимальных скоростей до 140 км/ч при повышении осевой нагрузки до 27-30 тонно-сил. Указанные тенденции неминуемо ведут к изменению картины динамических сил в конструкции ходовых частей вагона и требуют дополнительных теоретических исследований с целью выявления различных факторов, способных оказать воздействие на прочностные свойства ходовых частей вагона, и, как следствие, на их надежность и безопасность эксплуатации. Представленная диссертация посвящена исследованию одного из таких явлений – гироскопических свойств при быстром вращении колёсных пар, оценке их влияния на общую картину динамического взаимодействия между элементами ходовых частей вагона. Таким образом, тема диссертационной работы Мустафаева Ю.К. является актуальной.

Оценка структуры и содержания диссертации.

Представленная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Текст диссертации изложен на 184 страницах, из них ос-

новой текст работы включает 160 страниц машинописного текста, содержит 59 рисунков, 5 таблиц, библиографический список включает в себя 151 наименование; 2 приложения на 24 страницах содержат текст программы и акты использования результатов исследования.

Во **введении** раскрывается актуальность темы диссертационной работы и степень её разработанности, ставятся цели и задачи, приведена научная новизна и практическая значимость исследования, описана методология и методы исследования. Сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, приведены сведения о публикациях по теме исследования, об апробации работы и результатах её внедрения.

В **первой главе** рассмотрена исторически сложившаяся картина классификации научных и опытно-конструкторских работ в области динамики подвижного состава, а также современное состояние и тенденции развития исследований в данной области. Выявлены основные подходы к изучению вопросов динамики и взаимодействия ходовых частей железнодорожных экипажей и рельсового пути. Отмечены ведущие ученые и научные школы в области исследования динамики подвижного состава и совершенствования конструкции тележек грузовых вагонов. Приводится обзор конструкции и краткий перечень неисправностей трехэлементной тележки грузового вагона модели 18-100. На основании проведенного анализа ставится цель и составляется план дальнейшего исследования, реализуемый в последующих главах.

Во **второй главе** проводится исследование динамики колёсной пары с учётом её гироскопических свойств, обусловленных её вращением при движении экипажа. В указанной главе решается несколько подзадач: во-первых исследуется движение колёсной пары с коническим профилем поверхности катания колес по прямолинейному участку рельсового пути в динамической постановке задачи в сравнении с кинематической задачей Клингеля и эмпирическими результатами. Во-вторых, исследуются пространственные колебания колёсной пары при постановке задачи, в которой колёсная пара рассматривается как ротор в неравноупругих опорах. Автором получены уравнения движения, а также частотные уравнения, позволившие определить критические скорости движения по критерию возникновения резонансных колебаний. Оценено влияние гироскопических свойств на собственную частоту колебаний колёсной пары, проявляющееся в изменении этой частоты в зависимости от скорости вращения колёсной пары. Приведено сравнение динамических реакций буксовых опор при возникновении резонансов в случае модели, учитывающей гироскопические свойства колёсных пар по сравнению с моделью, в которой такое влияние не учтено. Отмечается, что при использовании модели, не учитывающей гироскопические свойства, динамические реакции буксовых узлов могут быть значительно занижены (в 5 и более раз в зонах резонансных скоростей). Исследования, проведенные во второй главе, теоретически обосновывают необходимость учёта гироскопических свойств, обусловленных вращением колёсных пар, при синтезе имитационных математических моделей динамики ходовых частей вагонов в случае реализации повышенных скоростей движения.

В **третьей главе** изложена общая методика построения математической модели динамики ходовых частей вагона на примере трехэлементной тележки грузового вагона, а также проводится синтез системы уравнений движения на основе предло-

женной методики. Для построения модели выбран метод составления системы уравнений движения механической системы в форме уравнений Лагранжа 2 рода. Для этого автором были введены системы координат, задающих пространственное положение каждого элемента тележки. Применение уравнений Лагранжа 2 рода обосновано тем, что при правильном математическом описании кинетической энергии тел системы гироскопические слагаемые включаются в уравнения движения естественным образом. Особое внимание уделено фрикционному гасителю колебаний, влияние которого представлено в виде элементарных работ сил сухого трения по взаимодействующим поверхностям. В результате автором получена система 30 нелинейных дифференциальных уравнений движения второго порядка, которые предложено решить численными методами.

В **четвертой главе** приводится общий порядок численного решения системы уравнений движения, приведены исходные данные и начальные условия, соответствующие параметрам реальной тележки. Отмечено, что недостающие массово-инерционные параметры получены путём 3D моделирования в соответствующих программных пакетах. В целях повышения быстродействия программы численного решения автором проведена частичная линеаризация системы решаемых уравнений. Проведено сравнение времени расчета по линеаризованной и исходной модели. Отмечено, что время расчета снижается в 7-9 раз при несущественном различии графиков выводимых параметров, в предельном случае не превышающем 1,5%. Автором проведена серия численных экспериментов с применением доработанной линеаризованной модели, направленных на исследование влияния гироскопических свойств вращающихся колесных пар, в целях которого представлено прохождение экипажем одиночной несимметричной неровности, вызванной просадкой рельсового пути. Отмечено возникающее при этом силовое воздействие, приводящее к перекосу конструкции тележки и увеличению углов набегания колесных пар. Кроме того, автором проведена оценка влияния неисправностей фрикционного демпфера на процесс гашения свободных колебаний экипажа и верификация модели путем сравнения коэффициентов вертикальной динамики тележек моделей 18-100 и 18-578 в сравнении с данными, полученными на основе моделирования при прохождении периодических неровностей, задаваемых в соответствии с РД 32.68-96. Отмечено, что расхождение на полученных графиках между экспериментальными данными и результатами моделирования не превышает 7%, графики имеют удовлетворительную сходимость.

В **заключении** приведены основные выводы по результатам выполненной работы, сформулированы перспективы дальнейшей разработки темы.

В **приложении** приведён листинг линеаризованной версии программы расчёта динамики ходовых частей трёхэлементной тележки грузового вагона. Приводятся акты об использовании результатов исследований в деятельности ООО «УКБВ» г. Нижний Тагил, а также в образовательном процессе кафедры «Вагоны» СамГУПС.

Поставленные автором цели и задачи диссертационного исследования обоснованы и решены в полной мере. Процесс решения поставленных задач последовательно отражен в главах диссертации. Работа написана технически грамотным и, в то же время, доступным языком, текст диссертации отражает высокий научно-исследовательский уровень подготовки автора, имеет логичную и связанную струк-

туру. Теоретический материал сопровождается необходимым и достаточным количеством иллюстраций и табличных данных. Таким образом, представленная автором диссертация является завершённой научно-квалификационной работой.

Достоверность и научная новизна полученных результатов.

Достоверность выдвигаемых автором научных положений обоснована применением соответствующего математического аппарата теоретической механики и высшей математики, подтверждается путем сравнения с известными экспериментальными данными. Разница между полученным автором результатом и экспериментальными данными не превышает 7%.

Научная новизна полученных автором результатов заключается в следующем:

1) разработана математическая модель тележки грузового вагона, учитывающая гироскопические свойства колёсных пар;

2) получена аналитическая зависимость и выполнен расчет частот собственных колебаний вращающейся колёсной пары при постановке задачи как ротора в опорах с различной жёсткостью в горизонтальном и вертикальном направлениях;

3) разработана методика, позволяющая провести оценку влияния статического и динамического дисбаланса на амплитуду и характер вынужденных колебаний колёсной пары при учете её гироскопических свойств, впервые проведена оценка вклада гироскопических сил в общую динамическую нагруженность буксовых узлов;

4) получены уравнения, позволяющие получить траекторию извилистого движения одиночной колёсной пары при различных скоростях движения с учетом влияния гироскопических свойств и при наличии упругого проскальзывания в точках контакта с рельсом.

Теоретическая и практическая ценность результатов диссертации:

1) получены уравнения, позволяющие аналитически определить и теоретически обосновать траекторию и длину волны извилистого движения колёсной пары с учётом ее гироскопических свойств и упругого проскальзывания в пятне контакта «колесо-рельс»;

2) получены математические зависимости собственных частот колебаний колёсной пары от скорости движения вагона и разработана методика оценки резонансных частот колёсной пары, позволяющая выявить критические скорости движения экипажа, при которых возникают наибольшие динамические воздействия, а также выработать способы вывода этих частот в зону неэксплуатационных скоростей;

3) разработана математическая модель колебаний колёсной пары в постановке задачи как вращение ротора в опорах, имеющих различную жесткость в продольном и вертикальном направлениях, которая, позволяет оценить дополнительный вклад в динамическую нагруженность буксовых узлов, вызванный наличием таких отклонений, как дисбаланс, эллиптичность и несоосность колёс при учете влияния гироскопических свойств;

4) разработана программа расчёта динамики тележки грузового вагона с учётом гироскопических свойств вращающихся колёсных пар, позволяющая проводить анализ зависимостей конструктивных параметров тележки на динамические и ходовые качества вагона, а также сократить сроки проектирования новых типов ходо-

вых частей грузовых вагонов за счет сокращения необходимого объема натуральных экспериментальных исследований.

Результаты исследования переданы, рассмотрены и рекомендованы к использованию в работе ООО «УКБВ», что подтверждается соответствующим актом, приведенном в приложении диссертации.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведённых в диссертации.

Разработанные автором методики и математические модели могут быть использованы отраслевыми предприятиями при проектировании новых конструкций тележек и модернизации существующих (при условии сходной структурной схемы) в части анализа и обоснованного задания параметров упруго-демпфирующих связей элементов конструкции, а также их массово-инерционных характеристик, путем подбора с проверкой на основе имитационного моделирования. Применение разработок автора позволит сократить сроки проектирования и модернизации за счет исключения необходимости проведения натуральных испытаний промежуточных вариантов конструкции, позволяя сразу перейти к реализации наиболее рациональных параметров по заданным выходным критериям. Можно также отметить, что проводимые автором исследования по оценке влияния гироскопических свойств колёсных пар на динамику ходовых частей следует расширить на пассажирское скоростное и высокоскоростное движение, а также на тяговый подвижной состав.

Соответствие содержания диссертации паспорту заявленной специальности

Представленная автором работа соответствует паспорту специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация, а именно пункту 6 «Оценка динамических и прочностных качеств подвижного состава» и пункту 10 «Взаимодействие подвижного состава и пути. Системы, средства и материалы, снижающие износ элементов пути и ходовых частей подвижного состава и повышающие безопасность движения».

Замечания по диссертации

1. В главе 2 автором рассмотрено движение одиночной колёсной пары с коническим профилем поверхности катания колес по прямолинейному участку пути в динамической постановке задачи при учёте влияния гироскопических свойств. Однако автором отмечено, что гироскопические свойства проявляются при высоких скоростях движения. В этом случае известно, что при извилистом движении колёсной пары происходит гребневой контакт, что не учтено в предложенной модели.

2. В главе 2 и 4 автором отмечается, что влияние гироскопических свойств от вращения колёсных пар существенно при высоких скоростях движения, однако нигде не указано, начиная с каких скоростей данные свойства начинают оказывать ощутимое влияние.

3. На странице 10 диссертационной работы и на странице 141 заявлено, что «разработана модель и методика оценки динамических реакций буксовых узлов, обусловленных гироскопическим эффектом вращающихся колёсных пар, ...». Вопрос – в чем суть методики оценки динамических реакций буксовых узлов?

4. Автор несколько идеализирует расчетные схемы: так, например, на странице 38, при описании механизма возникновения сил, вызванных гироскопическим

эффектом, следует пояснить как влияют зазоры (разность зазоров) в челюстных проемах боковых рам на величину этих сил действующих на колесную пару. На странице 52 следует фраза: «Учитывая теорему о движении центра масс и теорему об изменении момента количества движения, а также приняв $s_{лев} = s_{пр} = s$, составим дифференциальные уравнения движения колёсной пары». Однако, согласно Распоряжению ОАО РЖД от 01.06.2009 № 1145р допускаются зазоры в буксовых проемах в поперечном направлении до 18 мм. В этом случае автору следует объяснить принятие такого допущения.

5. В главе 3 и 4 при разработке математической модели тележки грузового вагона регулярно используется обозначение конкретной модели 18-100. Однако в расчетах задаются упруго-демпфирующие характеристики буксовых узлов. Такие характеристики логично задавать для тележек, имеющих упругую связь между буксой и боковой рамой тележки за счёт применения, к примеру, полиуретановых элементов в буксовых адаптерах. В оригинальной тележке модели 18-100, наоборот, возможно некоторое относительное перемещение корпуса буксы в челюстном проеме боковой рамы в пределах зазоров, указанных в предыдущем замечании.

6. При сравнении результатов численного моделирования прохождения периодических неровностей рельсового пути с результатами экспериментальных данных используется только коэффициент вертикальной динамики обрессоренных и необрессоренных масс, что является недостаточным для полной оценки адекватности разработанной автором модели. Следует провести сравнение с другими параметрами оценки динамики и качества хода в соответствии с Нормами для расчёта и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) или ГОСТом 33211-2014.

7. Можно ли модель клинового гасителя, разработанную в разделе 3.5.2 (представленную на рис. 3.5) применять для тележки модели 18-578? После модернизации тележки в клиновом гасителе появилась неподвижная и подвижная планки (10 и 6) мм. Как это повлияет на работу клина?

8 Замечание по рисунку 4.21 – учитывая, что схемы опирания кузова на тележку моделей 18-100 и 18-578 разные (в конструкции тележки модели 18-578 применяются скользуны постоянного контакта), возникает вопрос - каким образом автор получил данные для тележки модели 18-578? Как в математической модели учитывалось это существенное различие в работе тележек и кузова?

9. В тексте диссертации имеются редакционные неточности. Например, на странице 54 использован термин «...с осью РУ-5...», очевидно, имея в виду ось РУ1 или РУ1Ш. На странице 23 и далее по тексту используется формулировка «колёсная пара с коническим бандажём», что также некорректно в отношении колес грузового вагона, являющимися цельнокатанными. Следовало использовать термин «с коническим профилем поверхности катания».

Вышеперечисленные замечания не снижают ценности результатов, полученных автором, и не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение о соответствии диссертации критериям «Положения о присуждении учёных степеней»

Диссертация Мустафаева Юрия Кямаловича на тему «Динамика ходовых частей вагона с учётом гироскопических свойств колёсных пар» представляет собой

законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи по учету влияния гироскопических свойств вращающихся колёсных пар на показатели динамики ходовых частей вагона, что имеет значение для развития отрасли в области повышения скоростей грузовых и пассажирских перевозок и соответствует п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней...», а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки).

Отзыв подготовлен, рассмотрен и обсуждён на заседании кафедры «Вагоны» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», протокол от 08.06.2021 г. №10.

Заведующий кафедрой «Вагоны»,
кандидат технических наук, доцент _____ Колясов Константин Михайлович

Сведения о лице, утвердившем отзыв ведущей организации на диссертацию:
Бушуев Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент
научная специальность, по которой защищена диссертация – 05.22.08 – «Управление процессами перевозок».

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС),
Почтовый адрес: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66
Электронная почта: SBushuev@usurt.ru.
Контактный телефон: (343) 221-24-44.