На правах рукописи

ПАРАХНЕНКО Инна Леонидовна

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КОНТАКТЕ

«КОЛЕСО-РЕЛЬС» ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТРИБОЛОГИЧЕСКОГО

СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ РЕЛЬСОВ

Специальность 05.22.06 - Железнодорожный путь, изыскание и

проектирование железных дорог

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург, 2021

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Путь и железнодорожное строительство» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения»

Аккерман Сергей Г еннадьевич

кандидат технических наук Певзнер Виктор Ошерович

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник АО «Научно - исследовательский институт

железнодорожного транспорта», г. Москва Замуховский Александр Владимирович кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)» г. Москва

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов- на-Дону

Защита состоится «22» июня 2021 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 218.008.03 на базе ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» по адресу: 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9, ауд. 7-520.

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО ПГУПС (www.pgups.ru), на сайте Минобрнауки России (vak.minobmauki.gov.ru/main).

Автореферат разослан «22» апреля 2021 г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах заверенный печатью организации просим направлять в адрес ученого совета университета.

Ученый секретарь диссертационного совета, канд. техн. наук, доцент

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Протяженность кривых участков на сети железных дорог России составляет 33% от общей длины, из них 13% приходится на радиусы от 400 до 700 м. Фрикционное сопротивление, возникающее при прохождении экипажем кривых, особенно малого радиуса, вызывает рост энергопотребления, нарушение стабильности геометрии пути, интенсивный износ колес и рельсов. Эти проблемы тесно связаны с продольными и боковыми силами, возникающими в контакте «колесо-рельс». На силовое взаимодействие влияет множество факторов, однако стоит выделить основные - динамические и триботехнические. Динамические зависят от конструкции, технического состояния пути и подвижного состава и условий их взаимодействия. Триботехнические факторы можно разделить на трибологические - величина коэффициента трения на контактирующих поверхностях и технические - состояние профилей пары «колесо-рельс». Изменение трибологического состояния поверхностей рельсовых нитей, то есть снижение коэффициента трения в зоне контакта колеса и рельса (лубрикация), является одним из основных мероприятий, в рамках комплексной программы по ресурсосбережению «План развития ОАО «РЖД» до 2030 года», направленным на уменьшение износа пары.

Применение ресурсосберегающих технологий особенно актуально при повышении осевых нагрузок и скоростей движения, ресурса элементов верхнего строения до 2,5 млрд тонн пропущенного груза, постоянном росте цен на энергоносители, элементы железнодорожного пути и колесные пары. Снижение сопротивления движению поездов в кривых, увеличение стабильности железнодорожного пути, ресурса рельсов и колес, а, следовательно, и экономия напрямую зависят от величины и постоянства коэффициента трения в контакте путь-подвижной состав.

Определение трибологического состояния поверхностей катания и боковой поверхности головки рельсов, обеспечивающее наилучшее взаимодействие колес подвижного состава и рельсовой колеи, снижающее силовое воздействие и тем самым обеспечивающее устойчивость железнодорожного пути и снижение интенсивности бокового износа рельсов в кривых участках, актуально для всей сети железных дорог.

Разработка новых подходов к стратегии лубрикации зоны контакта «колесо-рельс» - востребованное направление последних лет. Представляемая работа является развитием научных исследований согласно «Стратегической программы обеспечения устойчивого взаимодействия в системе «колесо-рельс» ОАО «Российские железные дороги».

Степень разработанности темы исследования. Проблема

взаимодействия пути и подвижного состава освещена в трудах и публикациях российских ученых: Г.Л. Аккермана, С.М. Андриевского, Л.С. Блажко,

A. П. Буйносова, М.Ф. Вериго, А.В. Замуховского, О.П. Ершкова, А.А. Камаева, Н.И. Карпущенко, А.Я. Когана, В.С. Коссова, О.Г. Краснов, Ю.М. Лужнова,

B. С. Лысюка, Д.П. Маркова, В.Б. Меделя, Д.Ю. Погореловым, В.О. Певзнера,

Ю.С. Ромена, А.Н. Савоськина, Г.В. Самме, Г.М. Шахунянца,

А.К. Шафрановского, зарубежных Р. Жоли, И. Калкера, Ф. Картера, В. Кика,

О. Креттека, X. Хеймана, Ф. Фредерих и многих других. Вклад в вопрос состояния поверхностей внесли А.Г. Галичев, А.Ю. Ишлинский, И.П. Исаев,

C. А. Кондратенко, И.В. Крегельский, Ю.М. Лужнов, Ю.А. Панин, А.В. Трифонов. Успешно занимались и занимаются ученые и специалисты ВНИИЖТ, ВНИКТИ, РУТ(МИИТ), ПГУПС, РГУПС, СамГУПС, СибГУПС, ИрГУПС, ОмГУПС, БГТУ, БИТМ, ИПМаш РАН и других организаций.

Научное направление по исследованию взаимодействия подвижного состава и пути в кривых является актуальным на протяжении всего периода эксплуатации железной дороги. Определены и сформулированы основы теории движения и вписывания экипажа в кривые участки железнодорожного пути, выделены силы, определяющие устойчивость пути, разработаны и совершенствуются основные методы расчета сил взаимодействия. В недостаточной степени рассмотрены числовые значения коэффициентов трения на боковой поверхности и поверхностях катания (трибологическое состояние) рельсовых нитей и их влияние на силовое взаимодействие колеса и рельса в кривых.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является определение влияния трибологического состояния поверхностей катания рельсовых нитей на силы взаимодействия в контакте «колесо-рельс» с различными параметрами движения (скорость, нагрузка на ось, режим ведения поезда) и очертаниями профилей колесной пары и рельсов. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Экспериментальное определение коэффициентов трения на контактных поверхностях между колесами подвижного состава и рельсами в кривых.

2. Теоретическое исследование влияния триботехнического

(коэффициент трения и очертания профилей пары) состояния контактных поверхностей на силы, возникающие в контакте «колесо - рельс».

3. Определение функциональных зависимостей продольных и боковых сил в контакте при вариантах трибологического состояния поверхностей рельсовых нитей, радиусов кривых участков, состояния трибопары, параметров пути и движения (скорости, нагрузки на ось).

4. Разработка методики выбора эффективного варианта

трибологического состояния поверхностей катания рельсовых нитей в зависимости от параметров пути и движения поезда и выбор эффективного варианта лубрикации рельсов.

5. Расчет экономического эффекта от снижения силового

взаимодействия в зоне контакта.

Объектом исследования является зона контакта в системе колесо-рельс в кривых участках железнодорожного пути.

Предметом исследования является взаимодействие «колесо-рельс» при вариантах триботехнического (коэффициентов трения и очертаний профилей пары) состояния поверхностей катания рельсовых нитей с различными параметрами движения (скорость, нагрузка на ось, режим ведения поезда) и железнодорожного пути.

Научная новизна исследования состоит в следующем.

1. Экспериментальным путем получены коэффициенты трения на поверхностях рельсовых нитей при их различном трибологическом состоянии и вариантах параметров движения поезда.

2. Дана количественная оценка влияния триботехнического состояния поверхностей пары на силы, возникающие в зоне контакта «колесо-рельс».

3. Установлены функциональные зависимости величин силового взаимодействия при вариантах трибологического состояния поверхностей рельсовых нитей от радиуса кривых участков, параметров движения, параметров пути.

4. Разработана методика определения варианта трибологического состояния поверхностей рельсовых нитей, снижающего продольные и боковые силы, в зависимости от параметров кривых участков железнодорожного пути.

Теоретическая значимость работы заключается в выявлении теоретических алгоритмов оценки влияния триботехнического состояния контактирующих поверхностей на силы, возникающие в зоне контакта «колесо¬рельс» при движении грузового состава по кривым участкам железнодорожного пути с различными его характеристиками и параметрами движения.

Практическая значимость работы

1. На основе исследований влияния трибологического состояния поверхностей рельсов и параметров железнодорожного пути на силовые взаимодействия составлены графики для определения величин продольных и боковых сил в контакте с широким диапазоном возвышений наружной рельсовой

нити, даны практические рекомендации по выбору вариантов лубрикации поверхности катания рельсов.

2. Установлен и обоснован вариант трибологического состояния поверхностей взаимодействия колес и рельсов, обеспечивающий снижение эксплуатационных расходов на выправку пути и замену рельсов, энергетических затрат на тягу грузовых поездов.

Методология и методы исследования. В диссертационном исследовании использовались теоретические и экспериментальные методы. Теоретические методы представлены контактно-гидродинамической теорией смазки, многовариантным компьютерным моделированием продольных, боковых и вертикальных сил, возникающих в кривых участках пути при движении грузового состава, в программном комплексе «Универсальный механизм». Обработка результатов моделирования проведена с применением корреляционного и регрессионного анализа, теорией тяговых расчетов. Экспериментальные - натурными измерениями на действующем участке и обработкой результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального измерения коэффициентов трения на поверхностях рельсовых нитей при различном трибологическом состоянии и вариантах движения поездов.

2. Функциональные зависимости силового взаимодействия при вариантах триботехнического состояния поверхности рельсовых нитей от радиуса кривых участков, параметров пути и движения.

3. Методика определения наиболее эффективного варианта трибологического состояния поверхности рельсов, снижающего продольные и боковые силы, с учетом динамических горизонтальных сил в зоне контакта «колесо-рельс» и параметров пути в кривых.

4. Экономический эффект от снижения коэффициента трения на поверхности катания и выбор варианта трибологического состояния рельсов.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- использованием верифицированного математического аппарата («Универсальный механизм»), основанного на традиционных методах теоретической механики и численного интегрирования дифференциальных уравнений;

- сходимостью результатов экспериментальных измерений динамометрическим вагоном в составе грузового поезда и данных, полученных в ходе моделирования в программном комплексе (отклонение в среднем 9%);

- непротиворечивостью полученных результатов и имеющихся в литературе экспериментальных данных.

4

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались на: III Международной научно-практической конференции «Инновации и исследования в транспортном комплексе» (Курган, 2015), научном семинаре аспирантов (Екатеринбург, УрГУПС, 2015), Региональной научно-технической конференции «Транспорт Урала - 2018» (Екатеринбург, УрГУПС, 2018), Научно - технологическом совете под председательством главного инженера Свердловской железной дороги (Екатеринбург, ОАО «РЖД», 2019), XVI Международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посвященной памяти профессора Шахунянца Г.М. (Москва, РУТ, 2019), III Международной научно-практической конференции «Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах» (Санкт-Петербург, ПГУПС, 2019), IV Международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: пространственно¬технологическая синергия развития» (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2020), XI Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, ИрГУПС, 2020), XXIV Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии на железнодорожном транспорте» (Красноярск, 2020), Всеросийской научно-технической конференции «Транспорт Урала - 2020» (Екатеринбург, УрГУПС, 2020), XVII Международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посвященной памяти профессора Г.М. Шахунянца (Москва, РУТ, 2020).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 9 научных статей, из них 3 в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, 4 - в материалах национальных и международных научно¬практических конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, включающего 160 наименований. Основной текст диссертации изложен на 140 страницах, содержит 20 таблиц и 62 рисунка, а также приложения на 32 страницах.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, поставлена цель и определены задачи и методы, объект и предмет исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость, апробация работы.

В первой главе проведен анализ исследований и публикаций, посвященных вопросу взаимодействия подвижного состава и рельсовой колеи в кривых участках пути, выделены основные факторы, влияющие на работу системы «колесо-рельс», рассмотрены виды трения и изнашивания контакта, а также способы управления трением.

Ведущую роль в процессе взаимодействия между колесом и рельсом играет трение. Его влияние прослеживается в процессах вписывания в кривые: сцепление, торможение, изнашивание рельсов и колес при движении в кривых. В трибологии коэффициент трения f - отношение силы трения F к нормальной силе N, прижимающей тела друг к другу. В литературе встречается сравнение коэффициента трения f и коэффициента сцепления у (нормативная величина, определяемая на основе специальных испытаний и обобщения опыта эксплуатации дорог). Рекомендованное значение у при скорости движения 40 км/ч - 0,25, в некоторых случаях применяется и к коэффициенту трения f, что требует дополнительного рассмотрения.

Управлять коэффициентом трения в контакте «колесо-рельс» возможно путем введения «третьего тела». В середине ХХ века введено понятие - «лубрикация», то есть смазывание боковой поверхности наружной рельсовой нити. Исследования проведенные на дорогах Северной Америки, показали, что лубрикация наружного рельса позволяет уменьшить суммарный момент сил, действующих в контакте колесо - рельс, при вписывании в кривую. Проведенные американскими исследователями эксперименты по нанесению смазки на поверхность головки рельса показали, что в прямых при смазывании контактных поверхностей головки рельса за счет уменьшения величины коэффициента трения возможно существенное снижение расхода энергии на тягу и износа элементов подвижного состава и пути. В кривых этот эффект может быть еще более значительным. Для этого необходимо организовать процесс лубрикации поверхности катания рельсов так, чтобы при уменьшении коэффициента трения под колесами вагонов, коэффициент сцепления колес локомотива с рельсами оставалось неизменным.

Во второй главе проанализированы и систематизированы факторы, влияющие на интенсивность бокового износа рельсов, вызываемого силами, возникающими при взаимодействии колеса с рельсом. Для исследования приняты:

- криволинейные участки, особенно радиусом менее 400 м на которых увеличивается интенсивность износа более чем в 2 раза;

- величина возвышения наружной рельсовой нити, влияющая на распределение сил, действующих от наружного и внутреннего колес пары;

- неудовлетворительное состояние пути в плане, то есть наличие отступлений, усиливающих колебания подвижного состава. При совпадении частоты колебаний вагона с частотой волны неровности возможно возникновение резонанса, повышающего неблагоприятное силовое воздействие подвижного состава на путь;

- износ контактных поверхностей (профилей) трибопары.

Основной метод борьбы с боковым износом рельсов на сети железных

дорог - смазывание боковой поверхности наружной рельсовой нити, однако наличие рельсов со сверхнормативным износом увеличивается (по данным Свердловской железной дороги прирост в 2020 году составил 25%). Влияние применяемого смазочного материала на работоспособность в контакте учитывается в контактно-гидродинамической теории смазки, через определение толщины смазочного слоя h0 (2) и показателя оценки режима трения в контакте

А (1):

ho

S2 +^2 °а1+°а2

где Sa1 и Sa2 - среднеарифметическое отклонение шероховатостей поверхностей колеса и рельса.

где fo - абсолютная вязкость смазки при атмосферном давлении, Па-с;

Uz - суммарная скорость скольжения в контакте, м/с n - пьезокоэффициент смазочного материала, Па-1; qn - нагрузка на единицу контакта, Н/м.

Зависимость толщины смазочного материала и параметра режима смазки А позволяет сделать выводы о влиянии смазочного материала на ресурс контактирующих поверхностей колеса и рельса.

Эффективность лубрикации и действительные значения коэффициентов трения на контактных поверхностях рельсов были установлены в ходе экспериментального исследования. Натурные измерения коэффициента трения проводились портативным рельсовым трибометром (ВНИКТИ) по методике ВНИИЖТ. Основной целью эксперимента являлось исследование ресурса смазочного материала, применяемого на действующем участке железной дороги (КР-400) и получение коэффициентов трения при различных трибологических состояниях рельсовой колеи (рисунок 1). Эксперимент проводился дважды, при разных погодных условиях (в августе при сухой и теплой погоде и в сентябре, при понижающихся температурах и увеличивающихся осадках), в течении

24 часов. За это время пропущены грузовые поезда различного веса и длины (средняя нагрузка - 20,5 т/ось), пассажирские и пригородные.

По результатам экспериментов сделаны следующие выводы:

- коэффициент трения на боковой поверхности рельса при сухом (отсутствие смазочного материала на головке рельса) трибологическом состоянии, по результатам нескольких измерений - 0,4;

- с момента нанесения «третьего тела» на зону контакта до полной выработки материала, по рассматриваемому участку, прошло не более 15100 осей, что не соответствует рекомендуемому нормативному ресурсу применяемого смазочного материала (не менее 19000 осей);

- при лубриканте, нанесенном на боковую поверхность наружного рельса, максимальное пропущенное количество осей наблюдалось при значениях коэффициента трения, колеблющееся в диапазоне от 0,2 до 0,3.

Исходя из полученных значений для дальнейшего исследования приняты следующие значения коэффициентов трения:

при наличии в зоне контакта «третьего тела» - 0,25;

при сухом состоянии рельсовых нитей (без применения лубрикации) - 0,4.

Полученные, в ходе эксперимента, значения коэффициентов трения, зависящие от изменяющихся факторов, характерны для рассматриваемых случаев, и поэтому отличаются от встречающихся в научной литературе.

Третья глава содержит результаты имитационного компьютерного моделирования силового взаимодействия колес грузового состава и рельсов в кривых участках пути. Изменение триботехнического (коэффициентов трения и профилей пары) состояния в контакте «колесо-рельс», по проведенному анализу исследований в этой области, существенно влияют на силы, возникающие в горизонтальной плоскости. В работе исследовались горизонтальные поперечные - боковые, продольные силы, вертикальная сила, влияющая на устойчивость

колеса на рельсе и безопасность движения подвижного состава, а также силы в межвагонном пространстве.

Моделирование проводилось с применением программного комплекса «Универсальный механизм». Адекватность полученных в ходе исследования результатов подтверждена сходимостью натурных испытаний и итоговых значений моделирования. Исследование силового взаимодействия в контакте «колесо-рельс» проводилось поэтапно.

I этап. Создание расчетной модели грузового состава, выбор исследуемого участка с вариантностью параметров плана и профиля (таблица 1), назначение вариантов трибологического состояния поверхности рельсов.

Таблица 1 - Характеристика исследуемого участка

Элементы продольного профиля

(R-радиус, li-длина входной кривой, l-длина кривой постоянного радиуса, І2-длина выходной кривой, h-возвышение) Длина элемента, м

Прямая вставка 9i,0

Круговая кривая (левая): R=990 м, li=110 м, 1=285 м, І2=100 м h=35 мм 495,0

Прямая вставка, 372,0

Круговая кривая (левая): R=630 м, 1i,2=80 м, 1=281 м, h=85 мм 444,0

Прямая вставка 94,0

Круговая кривая (правая): R=540 м, 1i,2=100 м, 1=79 м, h=100 мм 279,0

Прямая вставка 42i,0

Круговая кривая (правая): R=380м, 1i =110 м, 1=148 м, 12=70 м h=70 мм 328,0

Прямая вставка, м i076,0

Общая длина 3600

Разработаны возможные варианты трибологического состояния поверхности катания рельсовых нитей (таблица 2). Для сравнения полученных результатов и оценки «эффективности» (снижение степени силового взаимодействия), проведены исследования с моделированием при эталонных вариантах - сухом состоянии поверхности рельсов и существующем способе - лубрикации боковой поверхности наружной рельсовой нити.

Таблица 2 - Трибологические варианты состояний головок рельсовых нитей

Вариант Трибологические состояние контактирующих поверхностей

i сухое состояние рельсовых нитей (без лубрикации) /тр=0,4

2 лубрикация боковой поверхности наружной рельсовой нити /р=0,25

(«классический» способ);

3 лубрикация поверхности катания наружного рельса, /Тр=0,25

4 комбинированная лубрикация: поверхность катания наружного рельса + боковая поверхности наружного рельса /тр=0,25

5 лубрикация поверхности катания внутреннего рельса /Тр=0,25

6 комбинированная лубрикация: поверхность катания внутреннего рельса + боковая поверхности наружного рельса /тр=0,25

7 лубрикация поверхности катания обеих рельсовых нитей /тр=0,25

II этап. Разработка последовательности многовариантного моделирования, адаптация модели взаимодействия и оценка влияния тяги на силовое взаимодействие.

Верификация и адаптация используемого комплекса проведена сравнением результатов, полученных в ходе моделирования, с данными, полученными после экспериментальной поездки динамометрического вагона в составе грузового тяжеловесного (9000 т) поезда. Определено отклонение средних показаний сил в межвагонном пространстве по итогам поездки динамометрического вагона и результатов значений сил, полученных в программной среде «Универсальный механизм». Разница экспериментальных и расчетных значений составила 9%. Отклонение 10-13% расчетной динамической вертикальной силы от результатов, полученных в ПК «УМ», позволяют говорить о адекватности модели.

В ходе проведённого имитационного моделирования (рисунок 2) силового взаимодействия в паре колесо-рельс выявлено, что максимальные продольные и боковые силы возникают у первой колесной пары вагона. Для исследований рассчитаны среднеарифметические значения сил в каждой кривой.

г : і

I Модель поезда - 2 тяговые единицы (ВЛ-80с), 62 цельнометаллических грузовых полувагонов , 3 единицы 3D вагонов (тележка і

. модели 18-100). Общая длина - 968 м, вес - 6494 т (при нагрузке 23,5 т/ось) и 7404 т (при нагрузке 27 т/ось). Поочередное .

моделирование продольных и боковых сил в каждой кривой всех колесных пар в разных местах состава (расстановка 3D-вагонов в ' голове, середине, хвосте). Отдельно для каждого колеса пары 1

я I I

| Э Обработка полученных в ходе моделирования результатов |

I Выбор колесной пары, с наибольшими силами I

!\_\_ ч

і— — — — — — — — — — — — — — — — — .

I g Проверка адекватности расчета полученных сил, сравнением результатов многовариантного моделирования. .

IJ! При расхождении полученных результатов более 10%, проведение повторного моделирования .

те Расчет средне арифметических значений сил взаимодействия от колесной пары с максимальными значениями показателей для всего Э состава и среднеквадратического отклонения полученных результатов

m I

Рисунок 2 - Последовательность многовариантного имитационного моделирования

Для оценки влияния режима ведения грузового поезда на силы, возникающие в контакте, рассмотрено движение на спуске, подъеме и площадке (рисунок 3). Продольные и боковые силы моделировались в зоне контакта «колесо-рельс» для первой колесной пары вагона, расположенного в середине состава на рассматриваемом участке. В среднем разница в полученных значениях продольных сил составила 7,1 - 9,2%, боковых - 5% говорит о влиянии режима ведения поезда на силы, возникающие в контакте «колесо¬рельс».

40 км/ч 60 км/ч 80 км/ч 40 км/ч 60 км/ч 80 км/ч

 торможение тяга выбег

Рисунок 3 - Влияние режима ведения грузового состава в кривой R=380 м, без лубрикации, на силы в контакте «колесо - рельс»

III этап. Выведены математические зависимости изменения продольных и

поперечных сил F как функции радиуса f(R) и скорости движения f(V). Для получения зависимостей принят метод статистической обработки исследований с помощью регрессионного анализа.

В работе исследовано два варианта нагрузок на ось (23,5 и 27 т/ось) и контактного взаимодействия трибопары (рисунок 4):

1. новое - профиль рельсов Р65 новый и новый (конический) профиль колес вагона (обеспечивающий двухточечный контакт в кривых);

2. среднесетевое -профиль рельса Р65 с боковым износом 4 мм и профиль колес (ДМетИ), имеющий несоответствие радиуса профиля гребневой области колеса, радиусу головки нового рельса Р65 (одноточечный контакт).

На основании результатов проведенного в работе многовариантного моделирования выявлены нелинейные регрессионные зависимости между величинами продольных Fn и боковых F6 сил радиусами кривых R, а также вариантами трибологического состояния при различных скоростях движения. В общем виде уравнение степенной регрессии для переменных выглядит:

Fn/б = a0Ra1

Коэффициенты а0 и а і определяются решением системы уравнений:

lnXj ■ ln УІ

t = 1 t = 1 t = 1

Пример графической интерпретации зависимостей продольных (рисунок 5) и боковых сил (рисунок 6) при вариантах триботехнического состояния пары колесо-рельс для скорости движения V=40 км/ч.

Рисунок 5 - Зависимости продольных сил от радиуса кривой и триботехнического

состояния пары

□ вариант 2 «классический» способ лубрикации

тубрикация поверхности А вариант 3 катания наружного рельса

лубрикация поверхности

 X вариант 4 атания наружного

рельса и боковой поверхности

лубрикация поверхности X вариант 5 катания внутреннего рельса

лубрикация поверхности - О вариант б катания внутреннего рельса и боковой поверхности

лубрикация

— ■ + вариант 7 поверхностей катания обоих рельсов

Таким образом проведенное исследование позволило сделать следующие выводы:

1. Продольные силы, возникающие при контактировании новых поверхностей трибопары, снижаются при уменьшении коэффициента трения на поверхностях катания обеих рельсовых нитей (вариант 7) в кривых малого радиуса до 58% (на 5,7кН) относительно сухого состояния и в пологих кривых до 33% (на 2,7кН) при скорости 80 км/ч. Применение лубрикации на поверхности одной из рельсовых нитей снижает продольные силы в кривой R=380 м: до 39% (на 3,6кН), при смазывании наружного рельса (вариант 3) и до 27% (на 1,9кН) при смазывании внутреннего рельса (вариант 6).

2. Боковые силы снижаются до 23% (на 8,5кН) при уменьшении коэффициента трения на поверхности катания внутренней рельсовой нити (вариант 5). Лубрикация поверхностей катания обеих нитей эффективна только в кривых R<500 м и скорости до 60 км/ч. Не выявлено рациональности применения лубрикации с целью снижения боковых сил в кривых R>900 м, так как при всех рассматриваемых вариантах полученные результаты имеют близкие значения.

3. Пропуск тяжеловесных поездов по участку со скоростью 40 км/ч увеличивает продольные силы от 6% до 11%, боковые силы на 16%-27% в пологих кривых, на 28% в кривой малого радиуса. (таблица 3). Применение лубрикации поверхностей катания обеих нитей снижает продольные силы на 60% (6,3кН) (R=380 м), боковые на 15% (6,4кН). Смазывание внутреннего рельса уменьшает значения боковых сил на 21% (7,9кН) (в кривой R=380 м). Снижение силового взаимодействия применением лубрикации для поверхности катания рельсов при тяжеловесном движении сопоставимо с нагрузкой 23,5 т/ось.

Таблица 3 -Значения максимальных сил при увеличении нагрузки на ось и сухом состоянии поверхностей рельсовых нитей

Нагрузка,

т/ось Продольные силы, кН Боковые силы, кН

 Радиусы кривых участков, м

 990 630 540 380 990 630 540 380

23,5 9,50 10,99 11,82 14,54 25,09 39,28 43,87 49,66

27 10,12 12,17 13,39 15,60 34,50 46,84 50,99 69,30

4. Изменение профилей констатирующих поверхностей колеса и рельса

в значительной степени влияет на силовое взаимодействие (таблица 4). Продольные силы возрастают до 70%, боковые силы снижаются до 65%. Объясняется это изменением типа контакта (рисунок 3) с двухточечного (при новых профилях трибопары) на одноточечный (при среднеизношенных профилях). Применение лубрикации на поверхностях катания рельсов снижает продольные силы на 27% в кривой малого радиуса.

Таблица 4 - Продольные и боковые силы при вариантах профилей контактирующих поверхностей без лубрикации

Силы, кН Продольные Боковые

Скорость,

км/ч Радиус кривой, м Тип профиля контактирующих поверхностей Изменение,

% Тип профиля контактирующих поверхностей Изменение,

%

 новый среднесетевой увеличение новый среднесетевой снижение

40 380 9,79 29,88 67,2 35,99 17,68 50,9

 540 9,25 26,78 65,4 27,69 11,53 58,4

 630 8,90 26,07 65,9 25,68 11,36 55,8

 990 8,06 21,52 62,5 17,79 7,84 55,9

60 380 10,22 27,51 62,9 36,63 15,54 57,6

 540 9,26 23,79 61,1 27,39 10,62 61,2

 630 7,88 22,66 65,2 24,44 9,80 59,9

 990 8,30 20,64 59,8 18,20 7,56 58,5

80 380 10,38 32,79 68,4 36,90 16,18 56,2

 540 9,34 30,78 69,7 27,58 12,10 56,1

 630 8,95 26,47 66,2 24,95 8,90 64,3

 990 8,40 20,85 59,7 18,45 6,99 62,1

5. Нанесение смазочного материала на боковую поверхность наружного рельса (вариант 2), как показали все проведенные исследования, не оказывает влияния на силы взаимодействия в контакте «колесо-рельс». Применение комбинированного способа (лубрикация поверхности катания одной из нитей и боковой поверхности наружного рельса, варианты 4 и 6) в сравнении со снижением коэффициента трения только на поверхности рельса, неэффективно для снижения продольных и боковых сил. Эти варианты в следующих исследованиях не рассматривались.

IV этап. Двигаясь в кривых участках железнодорожного пути экипаж испытывает колебания - волнообразное изменение сил, вызывающие «расстройства» пути, волнообразный и боковой износ рельсов, снижение ресурса колесных пар. Максимальное силовое взаимодействие и колебания возникают в круговой кривой при установившемся движении в круговой кривой. Исследование влияния изменения триботехнического состояния поверхностей на длину волны и амплитуду продольных и боковых колебаний показало:

- при контактировании новых профилей трибопары увеличиваются длины продольных на 1,9 м и поперечных волн в среднем на 2,6 м (в пологих кривых), и до 1 м в кривых малого радиуса, при смазывании поверхности катания внутренней нити;

- при среднесетевом износе трибопары длина продольной волны увеличивается до 22% (1,2м) при снижении коэффициента трения на поверхности катания внутреннего рельса. Увеличение до 17% (1,9м) наблюдается при лубрикации обеих рельсовых нитей. Негативное влияние поперечных колебаний снижается до 11% (0,7м) в кривых R>600 м и до 10% (0,9м) в кривых малого радиуса при смазывании поверхности катания внутреннего рельса;

- при повышении нагрузки на ось до 27 тонн увеличение длины поперечной волны до 34% получено при смазывании поверхности катания внутреннего рельса. В кривой малого радиуса применение рассматриваемых вариантов лубрикации не влияет на длину продольной волны. В остальных кривых лубрикация поверхности катания увеличивает длину продольной волны.

V этап. Важным параметром силового взаимодействия колеса и рельса является пространственное положение пути - возвышение наружного рельса. Проведено исследование влияния лубрикации поверхностей катания рельсовых нитей на продольные и боковые силы с варьированием возвышений от 40 мм до 140 мм с шагом 20 мм. Для обработки полученного массива данных и построения зависимости разработан алгоритм, основанный на методах статистического и корреляционного анализа. Выдвинута гипотеза о незначительном влиянии

скорости движения грузовых поездов на силовое взаимодействие в зоне контакта колесо-рельс. При математическом описании полученных зависимостей принята регрессионная степенная зависимость с максимальным индексом детерминации R2. Оценка значимости проверена F-критерием Фишера, сравнением ¥фак (4) фактического и Fma6 критического (табличного) значений. Определено соотношение значений факторной и остаточной дисперсий. Полученный уровень значимости не превышал 0,05, доказывая минимальное влияние скорости движения на силы, возникающие в контакте колеса с рельсом.

На основании полученных уравнений регрессии на данном этапе построены графики-зависимости продольных (рисунок 7) и боковых сил (рисунок 8) с большим диапазоном радиусов при варьировании возвышения наружного рельса и вариантах трибологического состояния поверхности рельсовых нитей при движении поезда на подъеме.

Варианты трибологического состояния поверхности рельсов 1 - сухие рельсовые нити

2 - лубрикация поверхности катания внутренней нити 3 - лубрикация поверхности катания наружной рельсовой нити 4 - лубрикация поверхностей катания обеих нитей Рисунок 7 - График-зависимость продольных сил при варьировании возвышения

Варианты трибологического состояния поверхности рельсов 1 - сухие рельсовые нити

2 - лубрикация поверхности катания внутренней нити 3 - лубрикация поверхностей катания обеих нитей Рисунок 8 - График-зависимость боковых сил при варьировании возвышения

Анализируя полученные зависимости при вариантном возвышении от 40 до 140 мм, можно сделать следующие выводы:

- максимальное продольное взаимодействие колеса и рельса возникает в кривых R<500 м при возвышении h=40 мм. В кривых R>500 м максимальные значения продольных сил получены при возвышении 60 мм. По результатам моделирования рекомендуемые возвышения для всех радиусов кривых при сухом состоянии нитей не ниже 80 мм;

- наибольшие боковые силы возникают в кривых малого радиуса, максимальные при возвышении 80 мм, минимальные при h>100 мм, разброс значений до 3,10 кН;

- снижение коэффициента трения на поверхностях катания внутренней или обеих рельсовых нитей эффективно снижает силовое взаимодействие в зоне контакта колеса и рельса.

По результатам выполненного исследования:

1. Установлено и оценено влияние трибологического состояния контактирующих поверхностей на силы в контакте «колесо-рельс».

2. Получены математические зависимости изменения силового взаимодействия при вариантах триботехнического состояния пары и различных параметров плана и профиля пути.

3. Разработана методика и практические рекомендации по выбору вариантов лубрикации поверхностей рельсов в зависимости от параметров кривых (рисунок 9). Экспериментально определены величины возвышения наружной рельсовой нити, обеспечивающие минимальные силовые взаимодействия, рекомендуемые при проведении работ по техническому обслуживанию.

4. Предложены варианты лубрикации, эффективно снижающие силовое взаимодействие при движении грузового состава в кривых.

В четвертой главе произведена оценка влияния принимаемых вариантов лубрикации поверхности катания рельсов на безопасность движения и рассчитан экономический эффект от уменьшения коэффициента трения на одной или обеих рельсовых нитях.

Изменение трибологического состояния в контакте колесо-рельс, влияющее на продольные и боковые силы, приводит к изменению вертикальных динамических сил, препятствующих повороту тележки в рельсовой колее и набеганию колеса на головку рельса, которое способно вызвать сход подвижного состава с рельсовой колеи.

Коэффициент запаса устойчивости от вползания колеса на рельс Куст является показателем, определяющим возможность схода экипажа:

тг (tan Р Я'Рвер

уст \_ (1+/ЧапЖРб0К+Рвер-/) > '

где Рвер - динамическая вертикальная нагрузка, действующая от колеса на рельс;

Рбок - боковая горизонтальная сила;

в - угол наклона образующийся конусообразной поверхности гребня колеса с горизонталью. Для новых колес с профилем по ГОСТ 10791-2011, tane=1,73;

f- коэффициент трения в зонах контакта колеса и рельса.

В ходе моделирования в ПК «Универсальный механизм» получены значения вертикальных сил в кривых и произведен расчет Куст (4) для двух вариантов профилей трибопары. Результаты расчетов показали, что «вползание» колеса на рельсовую нить, при новом состоянии профилей контактирующих поверхностей, с большой вероятностью может происходить при сухих рельсовых нитях в кривых радиусом менее 400 м при всех скоростных режимах. При среденесетевом износе профилей боковые силы, оказывающие влияние на

Куст, снижаются, соответственно возможность «вползания» колеса на рельс уменьшается. Однако, в кривой R=380 м, Куст близок к минимальному значению 1,2 (рисунок 10).

2.3 g 2.6

О

0

| 2.4 g 22

g 2.0

0 1-S к

S \-б

8 12 й

1.0

а - новое состояние профилей трибопары; б - среднесетевое состоянии профилей пары «колесо-рельс» Рисунок 10 - Зависимость Куст от радиуса и трибологического состояния при скорости

движении грузового состава V=40 км/ч

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что применение лубрикации на поверхности катания одной из рельсовых нитей, или обеих поверхностей катания, в значительной степени (до 1,9 раз) снижает возможность «вползания» колеса на рельс, повышая безопасность движения подвижного состава.

Основным критерием обеспечения безопасности движения является длина тормозного пути с момента начала торможения до полной остановки поезда. Понижение коэффициента трения на поверхностях катания рельсов увеличивает длину тормозного пути и может спровоцировать аварийную ситуацию. Методом численного интегрирования по интервалам времени рассчитаны длины тормозного пути при рассматриваемых вариантах трибологического состояния

рельсовой колеи для уклонов пути от -6 до 12 %о при движении грузового состава весом 6494 т с V=80 км/ч до полной остановки (рисунок 11). Для решения этой задачи получены значения сил в межвагонном пространстве в ПК «Универсальный механизм», возникающие в автосцепке между тяговым модулем и первым грузовым вагоном, численно равные сопротивлению, возникающему при равномерном движении состава.

—■— Сухое состояние поверхностей рельсов — А- Лубрикация поверхности катання обеих рельсовх нитей

Рисунок 11 - Расчетные длины тормозного пути

Применение лубрикации увеличивает длину тормозного пути от 17 до 29% в зависимости от крутизны уклона, при скорости начала торможения 80 км/ч, что укладывается в рекомендуемую длину тормозного по приказу начальника дороги. Это говорит о безопасности и бесперебойности движения, однако в некоторых случаях, для обеспечения пропускной способности может потребоваться перестановка путевых сигналов.

Экономическая эффективность от снижения коэффициента трения на поверхности катания рельсов определена от сокращения расходов на тягу поездов и снижение затрат на замену рельсов по предельному боковому износу.

Сравнение расчетных величин расходов топливно-энергетических затрат проведено как без применения, так и с применением лубрикации с учетом расхода ресурсов на собственные нужды локомотивов и их КПД в кривых участках железнодорожного пути. Стоимость топливно-энергетических затрат на 1 км пути рассчитана исходя из стоимости 1киловатт-час (4,08 руб.) на конец 2020 года для Свердловской области (таблица 5). Понятие «чистой экономии» введено для обозначения разности в стоимости затрат на 1 км между сухим трибологическим состоянием рельсовой колеи и рассматриваемыми вариантами.

Таблица 5 - Сравнение результатов расхода электроэнергии на тягу при вариантах трибологического состояния рельсовых нитей

Параметры Скорость, км/ч

 40 50 60 70 80

Сухое состояние рельсовых нитей

Аэ1км, расход электроэнергии на 1 км пути, кВТч 21,38 23,05 25,22 27,56 29,83

Сэ1км, стоимость энергии на 1 км пути, руб. 87,27 94,05 102,91 112,45 121,72

Лубрикация поверхности катания наружной рельсовой нити

Аэ1км, кВТч 20,43 22,77 24,21 26,13 28,435

Сэ1км руб. 83,38 92,93 98,77 106,61 116,02

Чистая экономия, руб 3,89 1,13 4,13 5,84 5,70

Лубрикация поверхности катания внутренней рельсовой нити

Аэ1км, кВТч 19,46 20,75 22,64 25,26 28,65

Сэ1км, руб. 79,39 84,66 92,36 103,05 116,87

Чистая экономия, руб 7,88 9,39 10,55 9,41 4,85

Лубрикация поверхности катания обеих рельсовых нитей

Аэ1км, кВТч 16,02 17,08 18,73 20,82 22,98

Сэ1км, руб. 65,36 69,70 76,44 84,95 93,77

Чистая экономия, руб 21,91 24,36 26,47 27,51 27,95

Затраты на топливно - энергетические ресурсы можно снизить до 23% при смазывании обеих рельсовых нитей и до 10%, снижая коэффициент трения на поверхности катания внутреннего рельса. Снижение потребляемой электроэнергии грузовых поездов в кривых, соответственно, уменьшение стекания тягового тока по рельсовым нитям благоприятно отразиться на выходе рельсов по дефекту 69 (поперечные коррозионно-усталостные трещины в подошве рельса).

Затраты на содержание рельсосмазывающего оборудования в среднем составляет 9,608 тыс. рублей в год (данные на 2019 год), в состав входит текущее содержание, ремонт, амортизация, прочие затраты. Доля протяженности кривых участков железнодорожного пути, подлежащих смазыванию, по данным ОАО «РЖД» составляет 0,36 или 9925,62 км. Годовой расход смазочного материала составит 9925,62 км\*0,25 кг/км=2481,4 кг при стоимости 80 руб/кг затраты на смазочный материал составят - 198512,42 руб. Удельная стоимость работы рельсосмазывателя составит 987,99 руб/км кривой.

Снижение горизонтального силового взаимодействия способно повлиять на интенсивность бокового износа рельсов, что сократит расходы на замену рельсов по предельному боковому износу, снизив:

- потребность в рельсах;

- расходы на работы по замене рельсов;

- расходы, связанные с предоставлением «окон» для замены рельсов.

Для оценки экономического эффекта от снижения коэффициента трения в

зоне контакта на боковой износ рельсов взят среднесетевой участок пути, имеющий 30% кривых разных радиусов. В расчетах учтены: срок службы рельсов до образования нормативного износа N, при сухом состоянии tj и с применением лубрикации t2, грузонапряженность участка Г, средняя интенсивность износа с учетом динамики изменения уср, стоимость работ Ср и простои Спр, связанные предоставлением «окон» и пропуском рабочих поездов, снижение силового взаимодействия. Г одовая экономия от снижения потребности в рельсах:

Д/р = AN-Ср (6)

AN = N(1-1) (7)

Г1 12

Т

t = ~ (8)

Т = — (9)

Уср

Д/ок = Спр • t0K (10)

где AN - изменение выхода рельсов по боковому износу, шт;

Т - наработанный тоннаж с образованием нормативного износа, млн.т.;

A - нормативный боковой износ рельсов - 15 мм.

В итоге экономия расходов на замену рельсов в кривых для эффективных вариантов лубрикации поверхности катания рельсов, по результатам исследования, составит 99420 руб/км в год при смазывании внутреннего рельса и 88490 руб/км в год при уменьшении коэффициента трения на обеих рельсовых нитях.

Наносить лубрикант на поверхность катания, независимо от возможных виляний рельсосмазывателей и вихревых потоков, возможно применяя бесконтактный струйный способ. На данный момент, такой способ доступен в локомотивах и вагонах-рельсосмазывателях. Применение локомотива целесообразно для лубрикации сразу за последней парой колес тягового модуля грузового подвижного состава. Лубрикантом, обеспечивающим коэффициент трения на поверхности катания от 0,2 до 0,25 является модификатор трения. Стойкость при однократном нанесении 250 - 300 осей обеспечивает стирание материала с поверхности катания рельса колесами грузового состава, не оказывая влияния на следующие экипажи.

Заключение

1. Выполнены экспериментальные измерения коэффициентов трения на боковой поверхности наружного рельса при различном трибологическом состоянии рельсовой колеи, произведен замер на поверхностях катания обеих

нитей. Получены значения коэффициентов трения при сухом состоянии рельсовых нитей - 0,4 и с нанесенным смазочным материалом - 0,25.

2. Оценено влияние режима ведения грузового поезда на силы контактного взаимодействия. Установлено, что действие силы тяги влияет на изменение продольных сил в среднем на 6%. Разница значений боковых сил составляет в среднем не более 7%.

3. Выявлено существенное влияние трибологического состояния поверхности катания рельсовых нитей на продольные и боковые силы, возникающие в контакте «колесо-рельс» при движении грузового состава с нагрузкой 23,5 и 27 т/ось по кривым участкам железнодорожного пути.

4. Определены функциональные зависимости сил взаимодействия между колесом и рельсом в зависимости от трибологического состояния поверхностей рельсов, скорости движения грузового состава и радиуса кривых при новом и среднесетевом профиле трибопары. Полученные при теоретическом исследовании результаты подтверждены сравнением с экспериментальными данными. Сходимость результатов в пределах 15% говорит об адекватности используемого математического аппарата.

Продольные силы, возникающие при движении грузового состава по кривым участкам железнодорожного пути, при нанесении «третьего тела» на поверхность катания обеих рельсовых нитей снижаются в 1,49 раза (на 5,7кН) при скорости V=40 км/ч и в 2,21 раза (на 5,6кН) при V=80 км/ч в кривой R=380 м. В пологих кривых сила снижается до 1,5 раз (до 4,9кН). Износ профилей трибопары ведет к увеличению продольных сил при всех рассматриваемых радиусах до 3,3 раз. Применение лубрикации на поверхности внутренней нити снижает силы в среднем на 11% (3кН), на наружном рельсе до 17% (5кН).

Боковое воздействие колесной пары на путь, при неизношенном состоянии трибопары меньше в 1,37(4,5кН)-1,47(8,55кН) раза при уменьшении коэффициента трения на поверхности внутреннего рельса в кривых малого радиуса. Применение лубрикации поверхности катания рельсовых нитей для снижения боковых сил в кривых R>700 м нецелесообразно. Изменение профилей контактирующих поверхностей снижает боковое воздействие от 50,9 до 64,3%.

5. Установлено влияние коэффициента трения на продольные и поперечные колебания экипажа. Применение лубрикации на поверхности катания внутренней рельсовой нити увеличивает длину продольной волны до 30%, поперечной до 22%, что способствует повышению стабильности железнодорожного пути, уменьшению волнообразного и бокового износа рельсовой колеи.

6. Разработана методика выбора вариантов лубрикации поверхностей рельсов в зависимости от параметров кривых. Определены величины

23

возвышения наружной рельсовой нити, обеспечивающие минимальное силовое взаимодействие.

7. Для обоснования возможности снижения коэффициента трения на поверхностях катания рельсов проведен расчёт основных критериев безопасности и бесперебойности движения - устойчивости колеса на рельсе и длины тормозного пути. Смазывание поверхности внутренней нити снижает возможность «вползания» до 1,87 раз в кривых малого радиуса. В пологих кривых при вариантах нанесения смазки, устойчивость колеса на рельсе увеличивается в 1,81 раза. Лубрикация увеличивает длину тормозного пути на подъемах в среднем на 23% (180 м).

8. Рассчитан экономический эффект от снижения коэффициента трения. Снижение топливно-энергетических затрат на тягу поездов составит от до 27,95 рублей на 1 км криволинейного участка в зависимости от скорости движения при лубрикации обеих нитей и 10,55 рублей при смазывании внутренней нити. Экономия на замену рельсов по достижению предельного износа - 99420 руб/км в год при смазывании внутреннего рельса и 88490 руб/км в год при уменьшении коэффициента трения на обеих рельсовых нитях.

9. Предложен вариант трибологического состояния рельсовых нитей, снижающий продольные и боковые силы - лубрикация поверхности катания внутренней рельсовой нити. Рекомендуется применение данного способа на затяжных подъемах в кривых радиусом до 1200 м при тяжеловесном движении и на прямых участках железнодорожного пути, из-за наличия отступления в плане и профиля, для снижения вероятности возникновения колебаний состава.

10. Рассмотрены способы нанесения материала на поверхность катания рельса оборудованием, применяемым на передвижных средствах лубрикации, и разработанными смазочными материалами, обеспечивающих коэффициент трения 0,2 - 0,25. Применение данного способа рекомендуется после предварительной качественной шлифовки рельсов, для устранения дефектов поверхности рельсовых нитей, способствующих накоплению смазочного материала.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и приравненных к ним:

1. Парахненко И.Л. Эффективность управления трением в контакте «колесо¬рельс» / И.Л. Парахненко, С.Г. Аккерман // Транспорт Урала Екатеринбург.: УрГУПС, 2014. № 2(41). С. 58-61. ISSN: 1815-9400.

2. Парахненко И.Л. Анализ сил взаимодействия в контакте «колесо-рельс» при различных трибологических вариантах / И.Л. Парахненко // Транспорт Урала. Екатеринбург.: УрГУПС, 2019. № 2(61). С.54-57. ISSN: 1815-9400

3. Парахненко И.Л. Управление трением, как способ снизить силовое воздействие экипажа на путь / И.Л. Парахненко, С.Г. Аккерман // Транспорт Урала Екатеринбург.: УрГУПС, 2021. № 1(68). С. 52-55. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-52-55. ISSN 1815-9400

24

Публикации в других научных изданиях:

1. Парахненко И.Л. Система колесо-рельс: как управлять трением /

И.Л. Парахненко // Федеральное информационно-аналитическое издание для руководителей РСП Эксперт Екатеринбург : 2013 № 12 С.26-27

2. Парахненко И.Л. Анализ сил взаимодействия в контакте «колесо-рельс» при различных трибологических вариантах / И.Л. Парахненко, С.Г. Аккерман // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: сборник трудов XVI Международной научно-технической конференция. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. - Москва. : РУТ (МИИТ), 2019. С. 292-295

3. Парахненко И.Л. Исследование влияния вариантов лубрикации на силы, возникающие в контакте «колесо - рельс» / И.Л. Парахненко, С.Г. Аккерман // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (Рилттранс-2019): сборник трудов третьей международной научно-практической конференции. Часть 1 Развитие транспортной инфраструктуры и управление перевозками. СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020 С. 367-382

4. Парахненко И.Л. Влияние лубрикации на безопасность движения грузовых поездов / И.Л. Парахненко // Инновационный транспорт. Екатеринбург : УрГУПС, 2020. № 1(35). С. 43-45. ISSN: 2311-164X

5. Парахненко И.Л. Снижение затрат на тягу поездов от применения новых подходов к системе лубрикации рельсов» / И.Л. Парахненко, С.Г. Аккерман // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : труды XXVI Всероссийской научно¬практической конференции КрИЖТ ИрГУПС (г. Красноярск, 25.11. - 27.11. 2020 г.) / редкол.

: В.С. Ратушняк (отв. ред.) [и др.] ; КрИЖТ ИрГУПС. - Красноярск: КрИЖТ ИрГУПС, 2020. С. 134-138

6. Парахненко И.Л. Исследование влияния вариантов лубрикации на силы

возникающие в контакте «колесо - рельс» / С.Г. Аккерман, И.Л. Парахненко // Сборник научных трудов IV международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: пространственно-техническая синергия развития», Рост. гос. ун-т. путей

сообщения. Ростов н/Д, 2020. С. 13-18

Тип. ПГУПС 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д9