

На правах рукописи

Коновалов Павел Юрьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ПЕСКОПОДАЧИ ЛОКОМОТИВОВ И УЛУЧШЕНИЕ ИХ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ**

Специальность 2.9.3 – «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и
электрификация»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону

2023

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, декан факультета «Электромеханический» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (РГУПС), г. Ростов-на-Дону
Яицков Иван Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга» ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения» (УрГУПС), г. Екатеринбург
Буйносов Александр Петрович
кандидат технических наук, доцент, директор Учебно-научного института транспорта, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (БГТУ), г. Брянск
Антипин Дмитрий Яковлевич

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)), г. Москва

Защита состоится «16» октября 2023 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 44.2.005.03 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС) по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 (главный корпус, читальный зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 и на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 44.2.005.03
доктор технических наук, профессор

В.А. Финоченко

Актуальность темы исследования.

Согласно «Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года» (Белая книга РЖД) с целью оптимизации транспортно-логистических услуг запланировано повышение перевозочной способности тягового подвижного состава (ТПС) за счет увеличения основных эксплуатационных показателей: скорости движения как в пассажирском, так и в грузовом движении, пробега локомотивов между экипировками, тяговых свойств локомотивов от 10 до 15 %. Реализация поставленных задач потребует проведения мероприятий по предотвращению и устранению избыточного проскальзывания колес тягового подвижного состава относительно рельсов.

На сегодняшний день активно проектируются и внедряются новые локомотивы с улучшенными тяговыми свойствами. Так, тяговые единицы железных дорог оборудованы догружающими устройствами и наклонными тягами для компенсации перераспределения сцепного веса, оснащены асинхронным тяговым приводом с поосным регулированием тяги, имеющим более жесткие тяговые характеристики и другие. Однако, несмотря на инновационные решения новых перспективных серий тяговых единиц, в эксплуатации по-прежнему наблюдаются негативные явления, связанные с избыточным проскальзыванием движущих колес локомотивов – боксование в тяговом режиме и юз при торможении, особенно в тяжелых условиях эксплуатации по сцеплению. Это связано с изменением в широких пределах величины коэффициента трения в зоне контакта колес локомотивов с рельсом, который зависит от большого количества факторов в эксплуатации, таких как: наличие на поверхности рельса промышленных загрязнений и влаги, погоднo-климатические условия, скорость движения, вес поезда, сложность профиля и плана железнодорожного пути, конструкционные особенности подвижного состава и многих других.

Наиболее распространенным способом повышения сцепления движущих колес с рельсами на подвижном составе железных дорог является подача частиц кварцевого песка в струе сжатого воздуха. Несмотря на то, что данные системы широко распространены и применяются на ТПС различного типа и назначения, они по-прежнему имеют низкую эксплуатационную надежность и недостатки – фиксированную сезонную регулировку расхода песка, применение импульсного регулирования подачи с различной скважностью импульсов, склонность к саморазрегулированию применяемых форсунок песочниц и избыточной неконтролируемой подаче песка, низкую скорость истечения песковоздушной смеси, что приводит к выдуванию частиц песка боковым потоком ветра в процессе транспортировки из выходного сечения подсыпного рукава в зону сцепления колес с рельсами.

Поэтому повышение и стабилизация величины сцепления движущих колес с рельсами, за счет непрерывной подачи частиц кварцевого песка с учетом фактических условий эксплуатации и в условиях уменьшения влияния вышеперечисленных факторов, при реализации мероприятий и технических решений, направленных на повышение эксплуатационных показателей пескоподающих систем, путем сниже-

ния вероятности проявления отказов и устранения недостатков и негативных конструктивных особенностей штатных систем, на сегодняшний день являются актуальной задачей.

Степень разработанности проблемы.

Изучением процесса взаимодействия колес локомотивов с рельсами и зависимостей величины сцепления от различных факторов посвящены работы многих зарубежных и отечественных ученых, таких как Крагельский И.В., Меншутин Н.Н., Минов Д.К., Розенфельд В. Е., Мугинштейн Л.А., Лисицын А.Л., Каменев Н.Н., Исаев И.П., Лужнов Ю.М., Колесников В.И., Пугачев А.А., Демин Ю.В., Космодамианский А.С., Пудовиков О.Е., Шаповалов В.В., Осенин Ю.И., Бестемьянов П.Ф., Голубенко А.Л., Самме Г.В., Буйносов А.П., Грачев В.В., Майба И.А., Джонсон К. Л. (Johnson K. L.), Барвела Ф. Дж. (Barwell F.J.), Картер Ф. В. (Carter F.W.), Калкер Дж. Дж. (Kalker J. J.) и другие. Обобщенные результаты исследований указанных авторов были использованы в качестве основы для выполнения данной работы.

Исследованию процессов, влияющих на величину сцепления, в научных публикациях по-прежнему уделяется большое внимание, а также способам стабилизации величины сцепления и повышению надежности основных узлов и агрегатов пневматических систем пескоподачи. В настоящее время активно модернизируются и разрабатываются новые усовершенствованные конструкции пневматических систем пескоподачи локомотивов.

Цели и задачи исследования.

Целями исследования являются совершенствование основных элементов систем пескоподачи локомотивов для плавного непрерывного дозирования количества песка и улучшение их эксплуатационных показателей.

Для реализации поставленных целей решаются следующие задачи:

1. Установить закономерности и степень влияния эксплуатационных факторов на величину сцепления и эффективность повышения и стабилизации величины коэффициента трения в зоне сцепления движущих колес с рельсами в различных условиях нагруженности тягового подвижного состава по сцеплению.

2. Создать трехмерные твердотельные модели основных элементов систем пескоподачи и реализовать вычислительные эксперименты с целью исследования газодинамических процессов при реализации пескоподачи.

3. Определить универсальную схему расположения подсыпного рукава относительно поверхностей головки рельса и бандажа колесной пары с наибольшей эффективностью процесса пескоподачи.

4. Разработать методику инженерных расчетов, направленных на увеличение скорости истечения песковоздушной смеси при сокращении расхода сжатого воздуха по сравнению со штатными системами для обеспечения транспортировки частиц кварцевого песка устойчивой к сдуванию боковым ветром величиной до 20 м/с.

5. Спроектировать и реализовать технические решения мероприятий плавного непрерывного регулирования дозирования количества песка из корпуса форсунки песочницы с учетом фактических условий эксплуатации поезда.

6. Построить модель управления плавным непрерывным дозированием количества песка и проверить адекватность применения алгоритмов нечеткой логики с применением самообучающихся генетических алгоритмов

7. Разработать усовершенствованную пневматическую систему пескоподачи тягового подвижного состава с улучшенными эксплуатационными показателями.

Объектом исследования является пневматическая система пескоподачи локомотива для транспортировки частиц кварцевого песка в зону контакта колес локомотивов с рельсами в струе сжатого воздуха.

Направлением исследования является улучшение эксплуатационных показателей систем пескоподачи локомотивов путем совершенствования ее основных элементов с целью реализации плавного непрерывного дозирования количества песка и повышения надежности процесса транспортировки частиц кварцевого песка в зону контакта колес с рельсами с учетом нагруженности по сцеплению.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Впервые предложена классификация систем пескоподачи локомотивов на основе анализа пескоподающих систем ТПС.

2. Разработана имитационная трехмерная модель пневматической системы пескоподачи с учетом влияния эксплуатационных показателей ТПС и воздействия внешней среды. На основе полученной трехмерной модели проведен вычислительный эксперимент и определены эффективные угол наклона, форма выходного сечения подсыпного рукава и скорость истечения песковоздушной смеси для реализации процесса пескоподачи с наибольшей эффективностью при сокращении потерь частиц кварцевого песка в процессе транспортировки в зону сцепления колес с рельсами, даже при воздействии бокового ветра силой до 20 м/с.

3. Усовершенствована математическая модель движения поезда с учетом возможности плавного непрерывного регулирования количества песка на основе алгоритмов «нечеткой логики» в зависимости от фактических условий эксплуатации и нагруженности по сцеплению локомотива; определен диапазон рекомендуемого расхода количества песка на погонный метр пути в зависимости от различных факторов с целью повышения и стабилизации сцепных свойств ТПС для предотвращения избыточного проскальзывания движущих колес с рельсами в режимах тяги и торможения, а также аналитически определена эффективность пескоподачи.

4. Предложена и на основе экспериментальных исследований подтверждена эффективность усовершенствованной системы пескоподачи с эффектом виброоживления слоя частиц кварцевого песка для плавного непрерывного дозирования его количества из корпуса форсунки песочницы за счет изменения частоты вибрационного воздействия через латексную мембрану поршнем пневматического пульсатора в зависимости от давления сжатого воздуха, подводимого к пневмоприводу, при увеличенной скорости истечения песковоздушной смеси для обеспечения ее устойчивого истечения из выходного сечения подсыпного рукава путем эжекции дополнительного объема воздуха через газовоздушный инжектор, установленный перед форсункой песочницы, с возможностью реализации продувки пескопровода из-за обеспечения раздельного независимого питания пневмовибропривода форсунки и газоструйного аппарата.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Технические решения работы по совершенствованию систем пескоподачи локомотивов расширяют функциональные возможности и улучшают эксплуатационные показатели, а также повышают надежность основных элементов и системы в целом, что позволит повысить величину сцепления колес локомотивов с

рельсами при сокращении расхода количества сжатого воздуха и подаче необходимого количества песка в широком диапазоне скоростей движения подвижного состава, особенно при низких величинах скоростей менее 30 км/ч до нуля при торможении с возможностью реализации пескоподачи для сокращения тормозного пути без наступления негативного избыточного проскальзывания до полной остановки поезда, а также при трогании с места в режиме тяги.

Разработаны и экспериментально подтверждены инженерные решения по модернизации систем пескоподачи серийных локомотивов для реализации плавного непрерывного регулирования расхода количества песка из корпуса форсунки песочницы посредством установки дросселирующего устройства с сервоприводом при повышении эксплуатационных показателей и надежности штатных форсунок песочниц путем замены регулировочного винта игольчатого типа на винт, оборудованный набором жиклеров с калиброванными отверстиями, рассчитанными на различный максимальный расход песка.

Произведены инженерные расчеты газовоздушного инжектора для увеличения скорости истечения песковоздушной смеси более 40 м/с за счет инъекции дополнительного объема воздуха при сокращенном расходе сжатого воздуха из питательной пневматической магистрали локомотивов по сравнению со штатными системами пескоподачи.

Спроектирована и разработана усовершенствованная система пескоподачи на основе эффекта виброоживления слоя частиц кварцевого песка для реализации плавного непрерывного дозирования количества песка за счет изменения частоты, амплитуды и величины возмущающего ударного воздействия на слой сыпучего материала в корпусе форсунки песочницы, а также экспериментально подтверждена устойчивость работы при внешнем вибрационном воздействии, которое имитирует колебания рельсового экипажа.

Предлагаемые мероприятия могут быть использованы при проектировании новых серий тягового подвижного состава, а также при модернизации и капитальном ремонте эксплуатируемого ТПС различного типа и назначения.

Методы и методология исследования базируются на методах планирования эксперимента, основных положениях теории вибрационной механики и реологии, а также расчета затопленного двухфазного течения турбулентных струй в спутном и поперечном потоках. В модель управления дозированием количества песка интегрированы алгоритмы нечеткой логики с применением синтеза правил нечеткой логики и глобальной оптимизации входных и выходных функции принадлежности на самообучающихся генетических алгоритмах. Теоретические результаты подвергались экспериментальной проверке и дальнейшей математической обработке полученных данных.

Степень достоверности результатов подтверждается корректностью принятых допущений при компьютерном моделировании с применением современных программных средств и вычислительных алгоритмов, а сходимость экспериментальных и теоретических данных указывает на достоверность представленных результатов.

Апробация результатов работы.

Основные положения по данной работе докладывались и обсуждались на: Международной научно-практической конференции «Транспорт-2003, 2004, 2006, 2011-2013, 2017-2019, 2020, 2022» (Ростов-на-Дону); Международной

научной конференции «Механика и трибология транспортных систем» (Ростов-на-Дону, 2003, 2011, 2016 гг.); Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство» (Ростов-на-Дону, 2009 г.); Всероссийской национальной научно-практической конференции «Современное развитие науки и техники (НАУКА)» (Ростов-на-Дону, 2017 г.); Международной научно-практической конференции «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения» (Ростов-на-Дону, 2018 г.); Международной научно-практической конференции «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава» (Ростов-на-Дону, 2019-2022 гг.); Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Севастополь, 2019-2021 гг.); Международной научно-практической конференции «Наука сегодня: проблемы и пути решения» (Вологда, 2020 г.).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационное исследование проведено в соответствии с паспортом научной специальности 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»:

П. 4. – Совершенствование подвижного состава, включая тяговый привод и энергетические установки автономных локомотивов; тяговых и трансформаторных подстанций, тяговых сетей, включая накопители энергии, преобразователи, аппараты, устройства защиты системы тягового электроснабжения. Улучшение эксплуатационных показателей подвижного состава и устройств электроснабжения, канализация обратного тягового тока.

П.6. – Улучшение динамических и прочностных качеств подвижного состава. Взаимодействие подвижного состава и пути. Снижение износа элементов пути и ходовых частей подвижного состава. Повышение безопасности движения, обеспечение работоспособности ходовых частей подвижного состава.

П.7. – Тяговые и тормозные расчёты. Тяговые и тормозные качества подвижного состава. Обеспечение безопасности движения подвижного состава.

Публикации.

По материалам диссертационной работы опубликовано 44 печатные работы, из них 10 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 – в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science. Общий объем 21,86 п.л., в том числе доля соискателя составила 11,13 п.л.

Структура и объем работы. Основное содержание исследования изложено на 228 страницах машинописного текста, в том числе 98 рисунков и 16 таблиц. Диссертация включает в себя введение, 5 глав, общие выводы и рекомендации, список использованных источников из 249 наименований и 6 приложений.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, кратко описана степень разработанности отечественными и зарубежными учеными поставленных целей и задач исследования, обозначены объект и предмет исследования, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая

значимости работы, степень достоверности результатов, а также представлены апробация, структура и объем диссертации.

В первой главе, на основе выполненного анализа отечественных и зарубежных литературных источников, с учетом многолетнего опыта эксплуатации рельсового транспорта, рассмотрены механизмы образования сил сцепления в режимах тяги и торможения в зависимости от нагруженности локомотивов по сцеплению, установлены зависимости изменения коэффициента трения на поверхности головки рельса по дорожке катания колес подвижного состава от различных условий эксплуатации, таких как погодные-климатические факторы, связанные с температурой окружающей среды и увлажненностью рельсов, скоростью движения поезда и сложностью плана и профиля пути, а также установлена эффективность пескоподдачи – как способа повышения и стабилизации величины сцепления в зоне контакта движущих колес локомотивов с рельсами.

Приведено обоснование, что для повышения эффективности стабилизации сцепления между колесом и рельсом в различных условиях и режимах эксплуатации пескоподдачу необходимо реализовывать обязательно непрерывно при реализации регулирования как по времени, так и по количеству подаваемого песка на погонный метр железнодорожного пути со скоростью истечения песковоздушной смеси, устойчивой к сдуванию боковым ветром в процессе транспортировки в зону контакта колес с рельсами.

По причине разнообразных способов подвода частиц песка под колеса локомотивов и большого количества конструкций основных элементов систем пескоподдачи впервые предложена классификация пескоподающих систем по различным эксплуатационным признакам (см. рисунок 1).

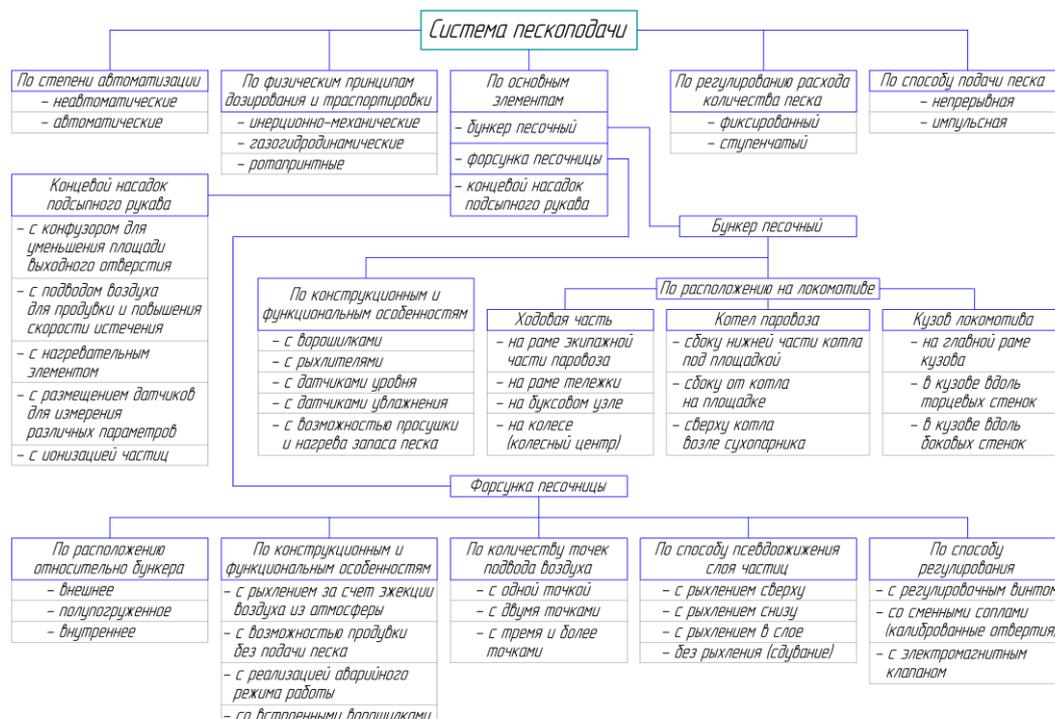


Рисунок 1 – Классификация систем пескоподдачи рельсового транспорта

Во второй главе определены эффективные эксплуатационные показатели систем пескоподачи локомотивов, такие как: скорость истечения песковоздушной смеси, схемы расположения подсыпного рукава относительно колес, угол наклона концевой насадки относительно плоскости поверхности катания рельса, размеры фракций зерен кварцевого песка, массовый расход песка из корпуса форсунки. При этом к эксплуатационным факторам работы пневматической системы пескоподачи отнесены: скорость спутного потока, который определяется скоростью движения локомотива; скорость поперечного потока – боковой ветр.

На железных дорогах различных стран и магистралях различного назначения используется кварцевый песок с наибольшим содержанием кварца и наименьшим содержанием вредных, особенно глинистых, примесей.

Определение зернового состава производилось по методике технических требований к песку для песочниц локомотивов и ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний». Отбор проб производился непосредственно с локомотива в реальных условиях эксплуатации. Полученный песок высушивался в сушильном шкафу до постоянной массы. Из подготовленного песка отбиралась навеска массой 1000 г для определения зернового состава.

Таким образом, получены численные значения параметром распределения размеров зерен песка, которые возможно использовать в дальнейшем при моделировании как с использованием физических моделей, так и при вычислительных экспериментах.

Распределение размеров частиц диаметром d определялось с помощью выражения Росина-Раммлера (Rosin-Rammler):

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n},$$

где n – параметр распределения;

\bar{d} – константа, по смыслу, представляющая собой средний диаметр частицы.

Исследования движение песковоздушной струи в спутном потоке были разбиты на два этапа. На первом рассматривалось движение песковоздушной смеси в спутном потоке при горизонтальном расположении подсыпного рукава без учета колеса локомотива и воздействия поперечного потока. Такая постановка задачи позволила определить осевую скорость струи и концентрацию песка по длине рельса. На втором этапе исследования была учтена скорость локомотива, расположение колеса, угол наклона подсыпного рукава и влияние бокового ветра.

В результате первого этапа вычислительного эксперимента определена концентрация песка на рельсе, что позволило определить начало участка с песком в зависимости от размера частиц песка m и скорости истечения песковоздушной смеси u_{0m} (см. рисунке 2, а), также определена длина участка с песком \bar{x} (см. рисунок 2, б).

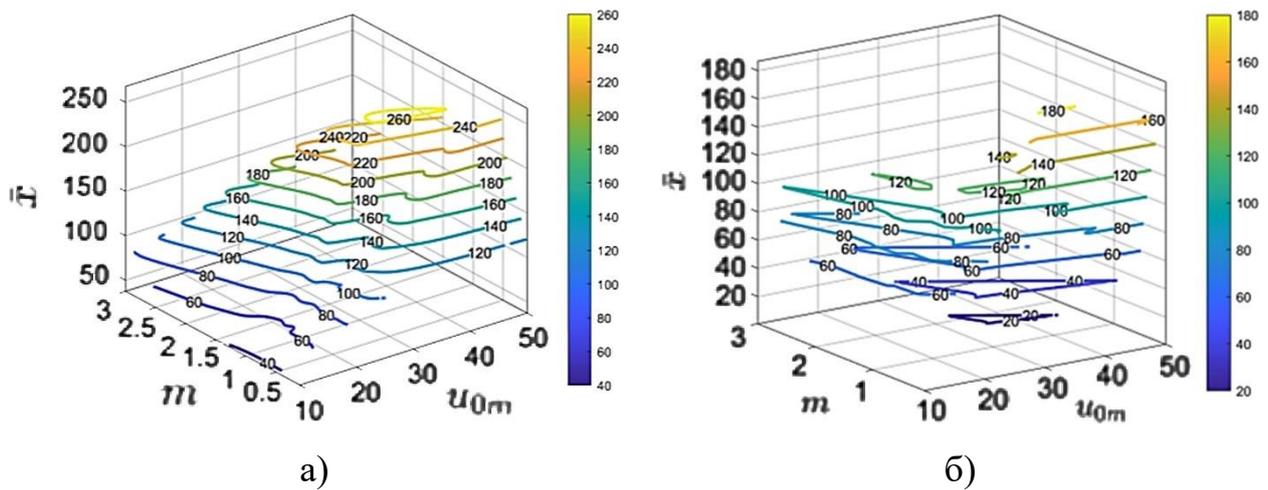


Рисунок 2 – Положение частиц песка на поверхности рельса
 а – координаты начала участка; б – длина участка

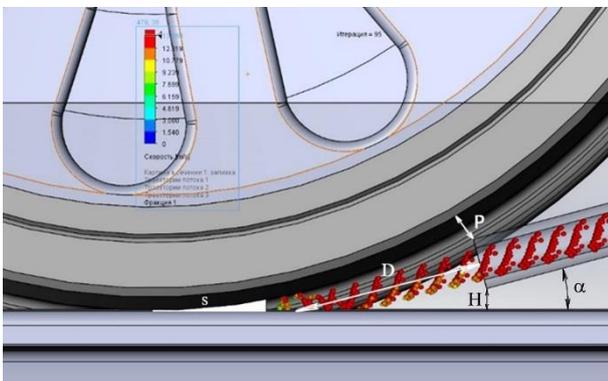


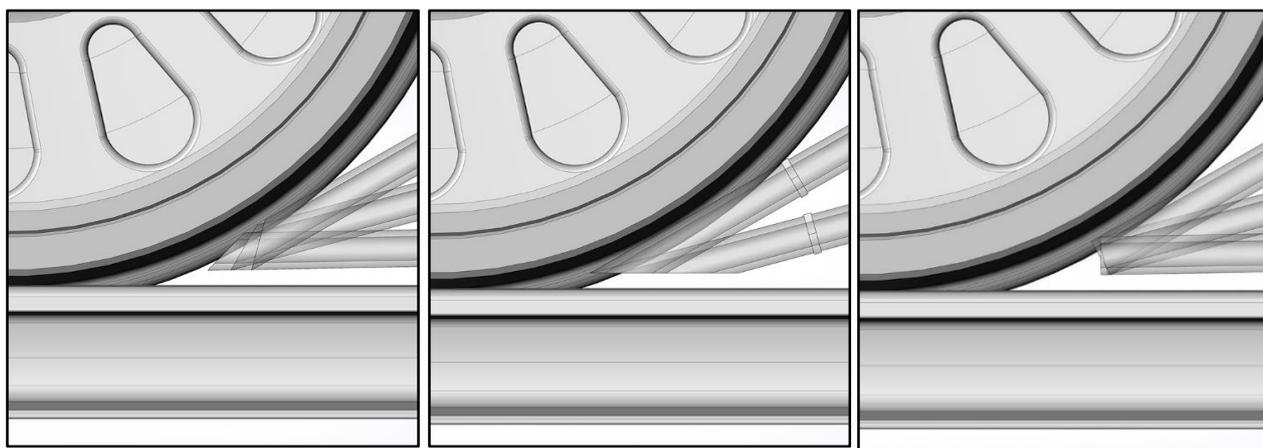
Рисунок 3 – Расчетная область и карта скоростей сферических частиц

Как следует из графиков, даже на довольно малых скоростях зерна песка падают на расстояниях, значительно превышающих 20 радиусов выходного сечения подсыпного рукава, что вполне достаточно, чтобы преодолеть дистанцию от подсыпного рукава до зоны контакта колеса с рельсом. Длина участка с песком (см. рисунок 2) зависит от скорости движения локомотива, однако установлено, что большая часть песка остается на поверхности контакта рельса.

Полученные результаты указывают на то, что при моделировании истечения песковоздушной смеси необходимо использовать алгоритм, учитывающий взаимное влияние частиц песка и воздушного потока, так как разница конечных скоростей на удалении от выходного сечения подсыпного рукава достигает до 30% от значений при расчете без учета взаимного влияния песчинок на поток, а для скоростей, в случае отсутствия поперечного потока, выходные параметры потока вполне удовлетворяют условиям эксплуатации и не требуется принимать дополнительных мер по увеличению скорости истечения песковоздушной смеси.

Второй этап моделирования проводился с учетом влияния скорости истечения песковоздушной смеси, скорости локомотива и величины бокового ветра при различных схемах расположения подсыпного рукава. Основным условием для данного эксперимента является сухая поверхность рельса и бандажа колеса, когда частицы песка могут свободно отскакивать и сдуваться, так как не прилипают, что усложняет попадание зерен в зону контакта движущих колес локомотивов с рельсами.

При моделировании истечения песковоздушной смеси с помощью систем автоматизированного проектирования рассматривались три принципиальные схемы расположения подсыпных рукавов (см. рисунок 4).



а

б

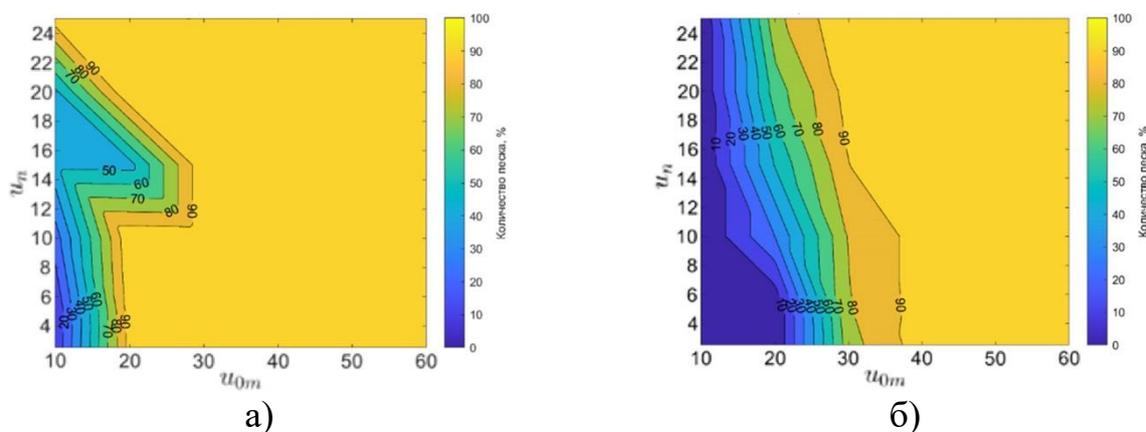
в

Рисунок 4 – Схемы расположения подсыпного рукава:

а – «электровозная»; *б* – «тепловозная»; *в* – комбинированная

«Тепловозная» схема при которой плоскость среза резинового наконечника должна быть параллельна головке рельса. «Электровозная» – со срезом рабочего края конца песочной трубы (наконечника) под углом 45 градусов, и «комбинированная», без среза, имеющая прямоугольную форму проекции подсыпного рукава. Ориентации выходного сечения различных схем расположения пескоподающих труб, указывают на их специфические особенности подачи частиц кварцевого песка под движущие колеса локомотивов: «тепловозная» схема независимо от угла расположения относительно поверхности рельса обеспечивает подачу зерен песка на поверхность рельса на некотором расстоянии от зоны взаимодействия колеса с рельсом, в свою очередь «электровозная» и «комбинированная» – позволяют выставить подсыпной рукав таким образом, что песковоздушная струя может быть направлена в точку касания колеса с рельсом при различных углах к поверхности рельса.

Моделирование позволило определить, что наиболее эффективным углом наклона α при принятых значениях R , H , D является $10\text{--}12^\circ$ (рисунок 3) при «комбинированной» и «электровозной» схемах расположения подсыпных рукавов.



а)

б)

Рисунок 5 – Концентрация количества сферических частиц в зоне s при скорости бокового потока 10 м/с (*а*) и 20 м/с (*б*)

В данном вычислительном эксперименте подтвердились выводы, полученные на первом этапе, что при нулевой или малой скорости поперечного потока песок практически в полном объеме доставляется в зону контакта – рисунок 5 (а). В случае если скорость поперечного потока составляет 20 м/с необходимо обеспечить скорость песковоздушной смеси не менее 40 м/с, чтобы осуществить доставку песка к зоне S в объеме 90% от расхода на входе в подсыпной рукав – рисунок 5 (б).

В третьей главе предложены технические решения по усовершенствованию штатных систем пескоподачи, применяемых на серийных локомотивах различного типа и назначения, способствующие улучшению их эксплуатационных показателей, путем повышения надежности регулировочной способности с возможностью реализации плавного непрерывного дозирования количества песка с увеличенной скоростью истечения песковоздушной смеси более 40 м/с.

Регулировка количества песка, подаваемого под колеса локомотивов, осуществляется регулировочным винтом игольчатого типа. Несмотря на многолетний опыт, использование данной конструкции в эксплуатации и применение различных вариантов резьбового соединения регулировочного винта, под воздействием динамических возмущений контрящее крепление ослабевает, что приводит к самовывертыванию и к избыточному неконтролируемому расходу песка.

С целью устранения данной проблемы саморазрегулирования предлагается новая конструкция регулировочного винта со сменным набором жиклеров, имеющим калиброванные отверстия, представлена на рисунке 6.

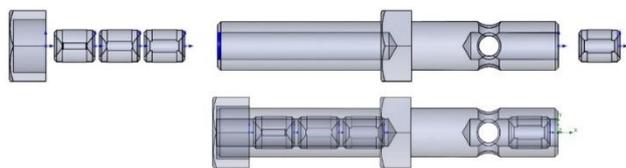


Рисунок 6 – Усовершенствованный регулировочный винт с жиклерами

Получены аппроксимирующие зависимости, упрощающие подбор диаметра отверстия жиклера регулировочного винта, основываясь на скоростях потока воздуха в характерных сечениях.

Получены значения диаметров отверстий для наиболее распространенных значений количества подаваемого песка с учетом рекомендаций по сезонному расходу и расположению колесных пар по ходу движения локомотива – 3,4; 3,1; 2,3 и 1,6 мм для 1500; 1200; 900 и 600 г/мин, соответственно.

Для увеличения скорости истечения песковоздушной смеси из подсыпного рукава системы пескоподачи локомотивов свыше 40 м/с предлагается применить эффект эжекции – подвод дополнительного объема воздуха из окружающей среды за счет создаваемого разрежения высоконапорным потоком в корпусе струйного аппарата. Определены параметры равнофазного (воздух-воздух) газоструйного инжектора без диффузора с коническим соплом и его основные геометрические размеры по представленной схеме на рисунке 7.

Определены геометрические и газодинамические параметры инжектора, обеспечивающего увеличение скорости истечения песковоздушной смеси в рекомендованных пределах от 40 до 70 м/с за счет изменения диаметра рабочего сопла без изменения геометрических размеров газовой струйного инжектора при

существенной экономии сжатого воздуха на одну форсунку песочницы в сравнении со штатными схемами с подводом дополнительного воздуха при пескоподаче.

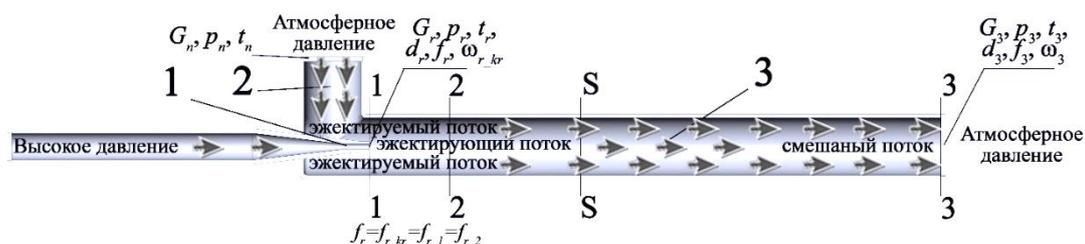


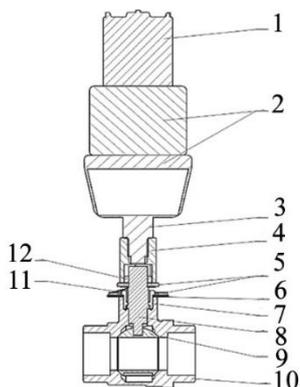
Рисунок 7 – Расчетная схема газоструйного инжектора для моделирования истечения песковоздушной смеси

1 – рабочее сопло; 2 – приемная камера; 3 – камера смешения; 1-1 – выходное сечение рабочего сопла; 2-2 – входное сечение камеры смешения; 3-3 – выходное сечение камеры смешения; S-S – произвольное сечение камеры смешения

Зависимость массового расхода эжектирующего газа G_r от диаметра сечения рабочего сопла d_r и давления перед ним p_r при критическом режиме истечения при ω_r – скорости истечения из критического сечения рабочего сопла, где i – значения величины давления сжатого воздуха перед соплом в интервале от 0,2 до 0,9 МПа, обозначенном рядом целых чисел 2...9 соответственно, определяется приведенной формулой

$$G_{i_r}(d_r) = \frac{\pi \cdot d_r^2}{4} \cdot \omega_r \cdot p_{i_r} / R_{gaz} \cdot t_r$$

Определена возможность осуществить непрерывную регулируемую подачу песка в область контакта колеса с рельсом при помощи разработанного вентиля с сервоприводом, установленного на трубопровод перед форсункой (см. рисунок 8).



1 – двигатель постоянного тока; 2 – редуктор понижающий; 3 – вал; 4 – муфта соединительная; 5 – шайба диэлектрическая; 6 – шайба изолирующая; 7 – гайка упорная; 8 – ось; 9 – шар с калиброванным отверстием; 10 – корпус крана; 11 – контакт подвижный датчика положения; 12 – гайка корончатая

Рисунок 8 – Разработанное дросселирующее устройство с сервоприводом

Создана имитационная твердотельная компьютерная модель для исследования газодинамических процессов в системе пескоподачи, в том числе с учетом движения зерен песка, которая показала удовлетворительную сходимость с результатами экспериментов.

Разработан стенд (см. рисунок 9), представляющий полноразмерную часть



Рисунок 9 – Стенд для испытания модернизированной системы пескоподачи

штатной системы подачи кварцевого песка под колеса локомотивов, что позволило провести исследования по совершенствованию и улучшению эксплуатационных показателей пневмосистемы, путем плавного непрерывного регулирования количества песка из корпуса форсунки с применением дросселирующего устройства с сервоприводом. Результаты эксперимента представлены на рисунках 10 и 11.

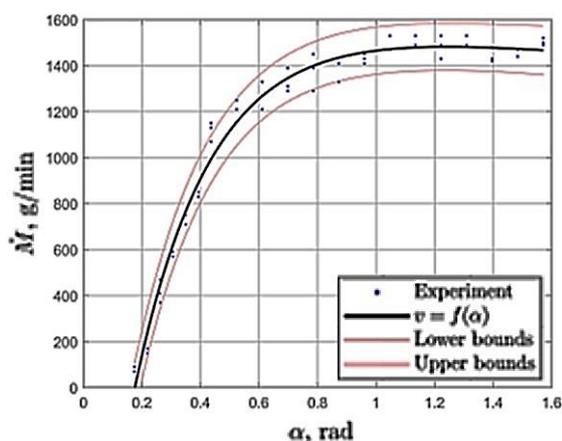


Рисунок 10 – Зависимость усредненного расхода подаваемого песка от величины угла поворота дросселирующего устройства с сервоприводом

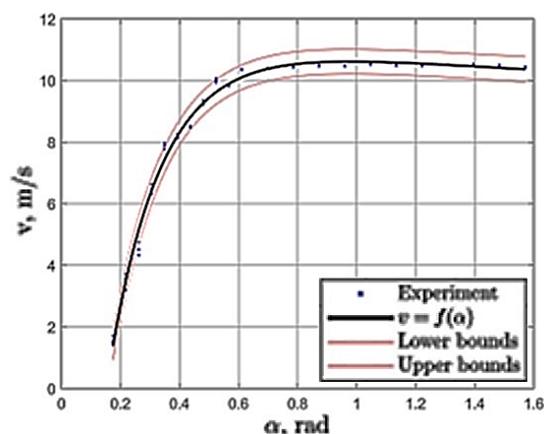


Рисунок 11 – Зависимость скорости истечения струи без песка от величины угла поворота дросселирующего устройства с сервоприводом

На основе полученных результатов разработана структурная схема усовершенствованной системы пескоподачи с улучшенными эксплуатационными показателями.

В четвертой главе по результатам натурального эксперимента по подаче песка на электровозе с новыми бандажами получены образцы песка на поверхности рельса после прохода колес, которые представляет собой слой частиц, разделенный на две отличающиеся по плотности упаковки фракции. В габарите дорожки катания движущих колес локомотива по поверхности рельса кварцевый песок размалывается и уплотняется, а ближе к внешним граням головки рельса слой песка имеет рыхлую структуру, с размером частиц, соответствующим диаметру зерен исходного песка, которые еще не попали в зону контакта колесо-рельс.

По результатам трибологических испытаний на машине трения ИИ 5018 по схеме «ролик-ролик» с постоянной величиной проскальзывания 10%, просеянные пробы песка и разделенные на три характерные фракции размерами до 0,1 мм, до 0,5 мм и более 0,5 мм, установлено, что все фракции песка оказали

положительное влияние на повышение коэффициента трения более 0,6, причем в эксперименте с частицами размером 0,1 мм, удалось зафиксировать наибольшие пиковые значения коэффициента трения.

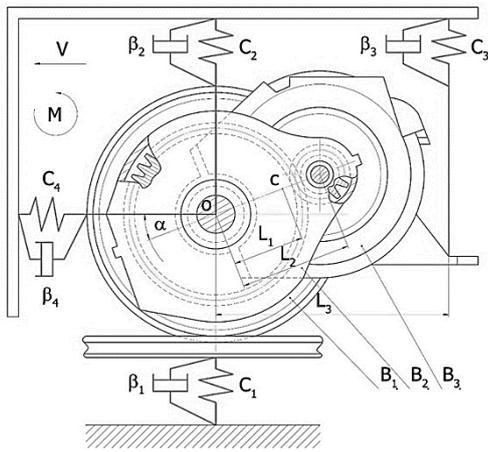
По различным методикам были определены плотность и пористость реальных кубической и гексагональных упаковок для слоя частиц кварцевого песка после прохода колес подвижного состава, которые составили для системы сфер с плотной кубической упаковкой равные $D_c=0,892$ и $m_c=0,108$, а для плотнейшей гексагональной – $D_g=0,983$ и $m_g=0,017$, также установлено, что для абсорбции количества влаги с дорожки катания поверхности рельса с наименьшим значением коэффициента трения 0,2, при толщине эквивалентной водяной пленки 0,005 мм или 0,5 мг/см², необходимо разместить на поверхности рельса 10 грамм песка на погонный метр при плотнейшей гексагональной и около 4 грамм – при менее плотной кубической упаковке сферических частиц песка условным диаметром 0,1 мм.

Построены зависимости расхода количества песка на погонный метр рельса от скорости движения локомотива при фиксированной регулировке расхода песка форсунками песочниц, из которых видно, что реализовать подачу рекомендованного количества песка на погонный метр пути возможно в строго определенных диапазонах скоростей движения локомотива, а также, что на низких скоростях движения при трогании с места подается избыточное количество песка свыше 200 грамм на метр пути. По этой причине современные нормы регулирования расхода песка на одну форсунку песочницы существенно снижены, а также при торможении при скорости менее 10 км/час пескоподачу прекращают.

Для определения подачи необходимого количества песка на погонный метр рельсового пути и прогнозирования величины коэффициента трения поверхности дорожки катания рельса в зависимости от ее увлажнения, предложено вычислять количество влаги апробированным методом, рекомендованным Всемирной метеорологической организацией, по известным значениям относительной влажности слоев воздуха, непосредственно прилегающих к рельсу, их температуры и температуры рельса.

Для реализации системы управления плавного непрерывного регулирования подачи необходимого количества песка в зону взаимодействия колес локомотивов с рельсами с учетом фактических условий эксплуатации и текущей обстановки в пути следования поезда на основе алгоритмов «нечеткой логики» (Fuzzy Logic) построена математическая модель, которая учитывает наличие сил сопротивления движению поезда и динамические процессы в тяговом приводе. В модели отражены основные свойства сцепления колеса локомотива с рельсом, в том числе зависимость сцепления от величины относительного скольжения, профиля пути и погодных-климатических факторов, таких как температуры воздуха и рельса, относительная влажность, а также движения поезда с использованием и без использования системы пескоподдачи.

Для составления уравнений движения использовались уравнения Лагранжа второго рода. Расчетная схема тягового электрического привода (ТЭД) и введенные обозначения показаны на рисунке 12.



C_1, C_2, C_3, C_4 – жесткости и $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – коэффициенты демпфирования, соответственно для рельсового пути, рессорного подвешивания, вертикальной и горизонтальной подвески ТЭД; o – центр инерциальной системы координат; c – центр тяжести ТЭД относительно оси колесной пары; $L_1 L_2 L_3$ – линейные размеры; α – угол наклона централи тяговой передачи к горизонтали; B_1, B_2 и B_3 – колесная пара, корпус и якорь ТЭД; M – положительное направление моментов; V – направление движения локомотива

Рисунок 12 – Расчетная схема опорно-осевого тягового привода с двусторонней передачей магистрального грузового электровоза

Система управления на основе нечеткой логики *fuzzySystem* приведена в удобный для оптимизации вид с входным параметром только v_{sl} .

$$S'_e = \{(x, fuzzySystem(x, y, z)): x \in v_{sl}\}, \text{ тогда } M_{fc} = \mu_n R P_o \psi_o k(\phi_{kp}) S'_e$$

где v_{sl} – текущая скорость скольжения колеса относительно рельса; M_{fc} – момент сцепления; R – радиус колеса, $R = 0,625$, м; P_o – осевая нагрузка колес локомотива на рельс, кН; ψ_o – безразмерный коэффициент сцепления при трогании локомотива с места; $k(\phi_{kp})$ – безразмерная характеристика для скорости скольжения колеса локомотива ϕ_{kp} ; μ_n – коэффициент трения по пути следования; S'_e – определяется как $0,01 \cdot S_e + 1$.

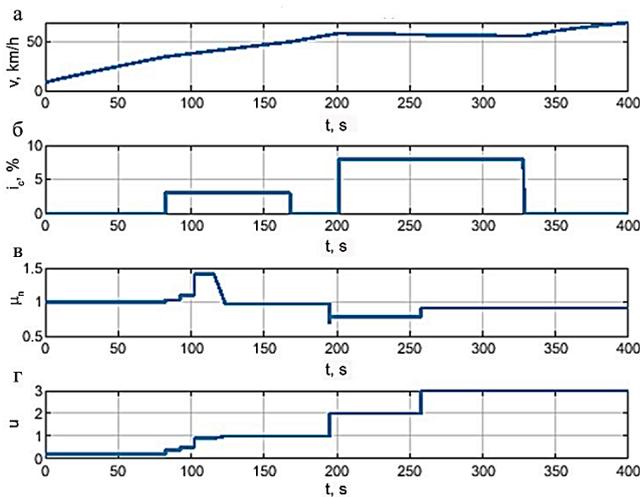


Рисунок 13 – Скорость движения поезда (а) и исходные данные по длине маршрута: приведенные уклоны (б), коэффициент трения (в) и увлажненность дорожки катания поверхности

Для синтеза правил нечеткой логики и оптимизации входных и выходных функций принадлежности можно применять самообучающиеся генетические алгоритмы, а в качестве целевой функции достаточно использовать максимум пройденного расстояния поездом $J = \max S$.

Исходные данные для моделирования движения и оптимизации показаны на рисунке 13, влияющие на режимы нагруженности локомотива по сцеплению.

Результаты моделирования движения локомотива представлены на рисунке 14 (а). Несмотря на снижение сцепления и подъем, получена ско-

рость движения, характерная для идеальных условий. Штриховкой показаны интервалы включения системы пескоподачи.

Более подробно процесс подачи песка показан на рисунке 14 (б). Система была настроена на включение пескоподачи при скорости скольжения движущих колес больше 0,4 м/с и выключалась по достижении скорости 0,1 м/с. Участки включения характеризуются подъемом и повышенной влажностью на поверхности рельса, которая приводит, в итоге, к снижению сцепления.

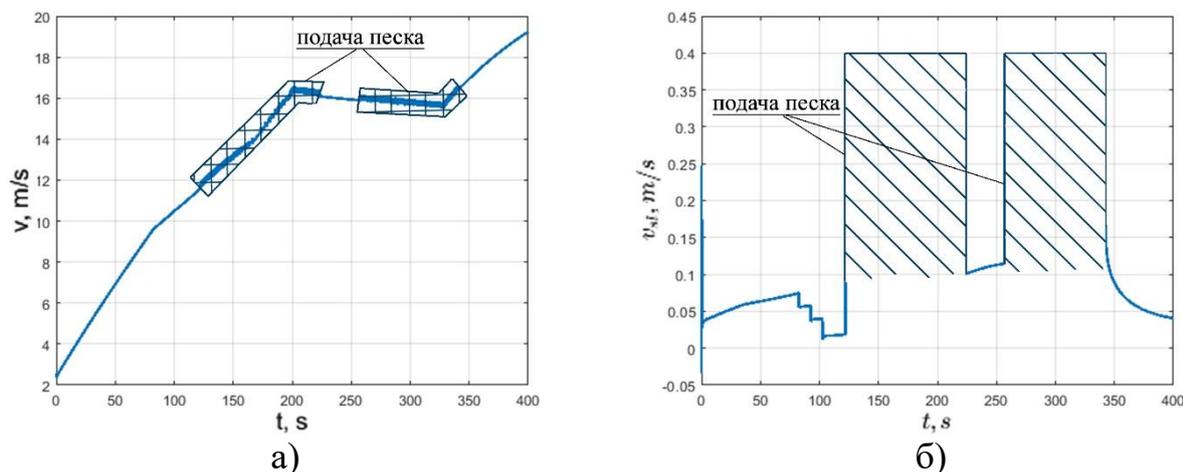


Рисунок 14 – График изменения тягового момента M_t при подаче песка системой пескоподачи локомотива (а) и изменения скорости скольжения колес (б)

В пятой главе разработана усовершенствованная система пескоподачи с дозированием количества песка на основе нового физического эффекта за счет



Рисунок 15 – Испытательный электромагнитный вибростенд для определения возможности плавному непрерывному дозированию количества песка путем виброоживления слоя части песка

виброоживления слоя частиц песка в корпусе форсунки песочницы посредством поршневого пневматического пульсатора одностороннего действия.

Для практического подтверждения и теоретического обоснования реализации плавного непрерывного дозирования песка путем применения эффекта виброоживления слоя песка были проведены испытания в несколько этапов.

Первый этап был направлен на разработку физической модели системы пескоподачи локомотива, путем проведения эксперимента по виброоживлению слоя песка в корпусе форсунки песочницы электромагнитным вибростендом (см. рисунок 15) и осуществления непрерывного дозирования количества песка за счет изменения амплитуды и частоты вибрационного воздействия, а также теоретического описания процессов при определении частот, на которых система имеет наибольшую производительность. Результаты представлены на рисунке 16.

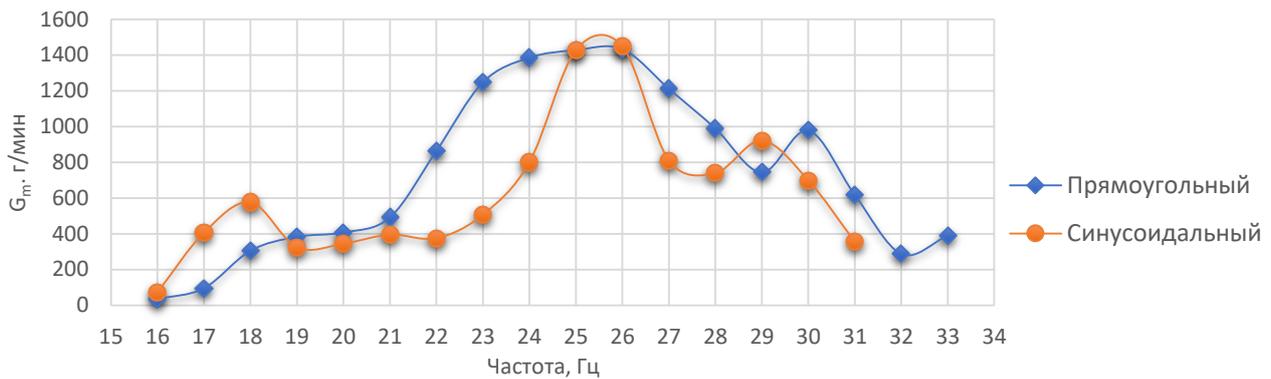


Рисунок 16 – Зависимость массового расхода песка при воздействии прямоугольных и синусоидальных импульсов в зависимости от частоты колебаний



Рисунок 17 – Испытательные стенды по моделированию непрерывного дозирования количества песка путем виброоживления слоя части песка за счет изменения частоты силового воздействия поршнем пневмопulsатора

Как видно из рисунка 16, подача генератором импульса прямоугольной формы демонстрирует более плавную кривую. Было также установлено, что массовый расход кварцевого песка из корпуса форсунки песочницы увеличивается при уменьшении угла наклона установки при постоянном вибрационном возмущении и имеет четко выраженный прямолинейный характер.

На следующих этапах источником вибрационного воздействия на слой кварцевых частиц в корпусе форсунки являлся пневматический поршневой pulsатор одностороннего действия, в котором частота движения поршня и силовое воздействие меняется в зависимости от величины давления сжатого воздуха, подведенного к вибропulsатору. Для возбуждения колебаний в экспериментах использовался сжатый воздух, так как на тяговом подвижном составе это распространенный ресурс, используемый в существующих системах пескоподачи.

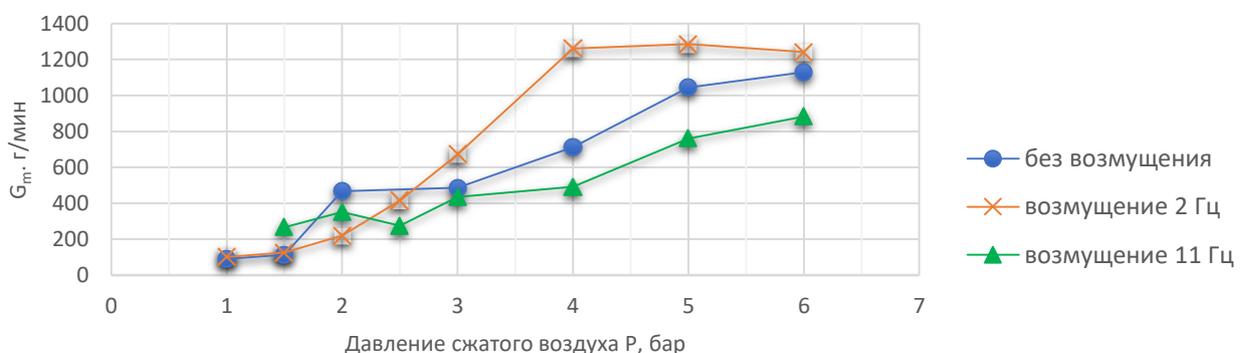


Рисунок 18 – Расход кварцевого песка из корпуса форсунки песочницы в зависимости от давления сжатого воздуха в вибропulsаторе и частоты возмущений

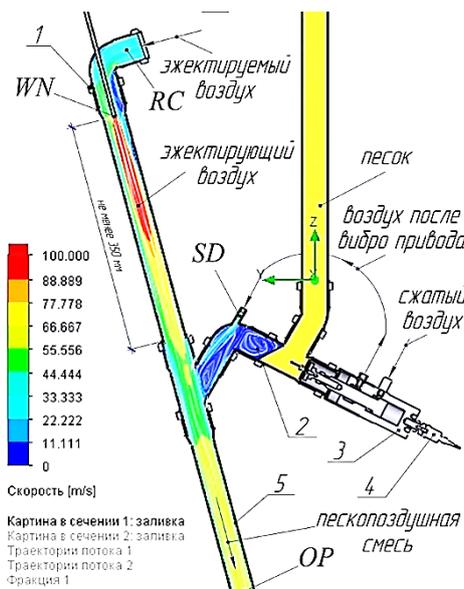


Рисунок 19 – Система пескоподачи: 1 – инжектор; 2 – форсунка песочницы; 3 – вибропривод; 4 – акселерометр; 5 – подсыпной рукав

внутренних полостей воздухопроводов (см. рисунок 19) при расчетной скорости истечения песковоздушной смеси равной 50 м/с, что отображено цветовой схемой.

Основное требование для размещения инжектора (2) – расстояние от приемной камеры до форсунки песочницы (3) не менее 350 мм, так как данный отрезок трубопровода является смесительной камерой и соблюдение данного размера необходимо для выравнивания профиля скоростей воздушного потока без создания дополнительных местных сопротивлений и потери производительности.

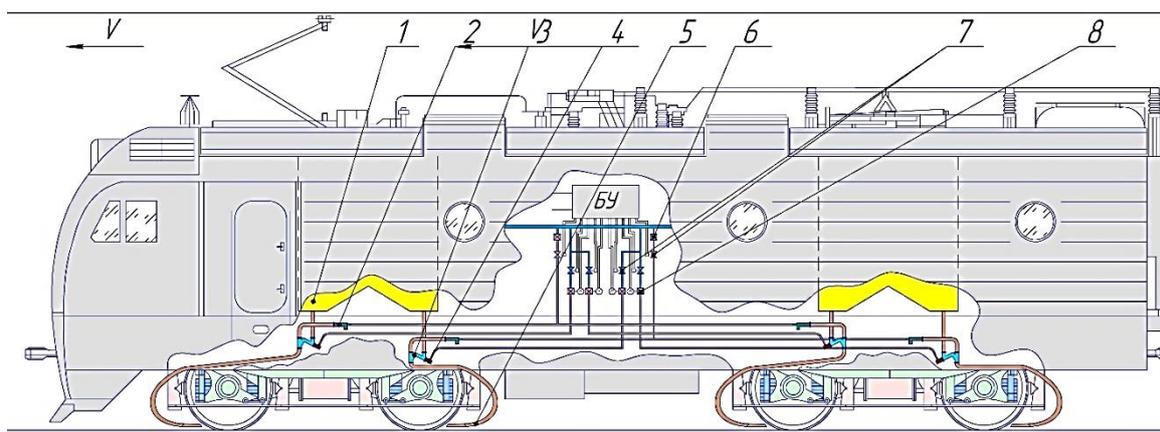


Рисунок 20 – Усовершенствованная система пескоподачи
1 – песочный бункер; 2 – газоструйный инжектор; 3 – корпус усовершенствованной форсунки песочницы; 4 – пневматический вибропульсатор; 5 – подсыпной рукав; 6 – пневматический редуктор; 7 – электропневматический клапан; 8 – пневматический редуктор с электроприводом; БУ – блок управления

Конструкция разработанной лабораторной установки (см. рисунок 17) позволила провести исследования с учетом ее работы в условиях приложения внешних возмущений, моделирующих вибрационное воздействие на корпус форсунки песочницы с частотными характеристиками, которые имитируют возмущения при движении локомотива и без возмущений. Результаты экспериментов приведены на рисунке 18.

Опираясь на алгоритм работы и результаты исследований модернизированной системы пескоподачи для магистральных локомотивов с применением эффекта виброоживления слоя песка в корпусе форсунки песочницы при плавном непрерывном регулировании количества песка, а также эффекта эжекции для увеличения скорости истечения песковоздушной смеси, представлена твердотельная модель разработанной новой системы пескоподачи с картой распределения скоростей потоков внутренних полостей воздухопроводов (см. рисунок 19) при расчетной скорости истечения песковоздушной смеси равной 50 м/с, что отображено цветовой схемой.

Особенностью усовершенствованной системы пескоподачи является и то, что питание сжатым воздухом инжектора и вибропривода осуществляется независимо для реализации режима продувки пескоподающих труб за счет активации только газовоздушного аппарата без подачи песка. Воздух, использованный для приведения в действие вибропульсатора (4) не выбрасывается в атмосферу сразу из вибропривода (4), а направляется в корпус форсунки (3) для более надежного перетекания частиц песка из форсунки в скоростной поток для дальнейшей транспортировки через подсыпной рукав (5) песковоздушной смеси в зону контакта колес с рельсами. Датчик ускорений на торце пневматического вибропривода (4) необходим для получения обратной связи о величине частот вибрационного воздействия на слой песка в корпусе форсунки песочницы (3).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Общие выводы

1. Впервые предложена классификация систем пескоподачи тягового подвижного состава на основе анализа конструкций и принципов действия пескоподающих систем локомотивов различного типа и назначения.

2. Определены эффективные угол наклона и схема расположения подсыпного рукава, а также скорость истечения песковоздушной смеси для реализации процесса пескоподачи с наибольшей эффективностью при сокращении потерь частиц кварцевого песка в процессе транспортировки в зону сцепления колес с рельсами при воздействии бокового ветра силой до 20 м/с. Установлено, что универсальная схема расположения подсыпного рукава и углов наклона его относительно поверхности рельса – «комбинированная» при углах $10+2^\circ$. Данное расположение песочных труб позволяет обеспечить гарантированную доставку зерен кварцевого песка в зону контакта колеса с рельсом в объеме не менее 90% при условии, что скорость истечения песковоздушной смеси из выходного сечения будет реализована более 40 м/с.

3. Произведен инженерный расчет геометрических и газодинамических параметры, на основе которых предложена конструкция газовоздушного инжектора для увеличения скорости истечения песковоздушной смеси более 40 м/с за счет инжекции дополнительного объема воздуха при сокращенном расходе сжатого воздуха из питательной пневматической магистрали локомотивов на одну форсунку песочницы, по сравнению со штатными системами пескоподачи. Разработаны компоновочные схемы расположения инжектора для систем пескоподачи локомотивов с возможностью увеличения скорости истечения песковоздушной смеси и продувки пескопроводов без реализации подачи песка.

4. Разработан стенд, представляющий часть штатной системы пескоподачи локомотива, на котором экспериментально исследована система для реализации плавного непрерывного регулирования расхода количества песка из корпуса форсунки песочницы посредством установки дросселирующего устройства с сервоприводом при повышении эксплуатационных показателей и надежности штатных форсунок песочниц путем замены регулировочного винта игольчатого

типа на винт с набором жиклеров с калиброванными отверстиями, рассчитанными на максимальный расход песка. На основе трехмерной компьютерной модели в реальном масштабе основных элементов системы пескоподачи для исследования газодинамических процессов в системе пескоподачи, в том числе, с учетом движения зерен песка, получены аппроксимирующие зависимости, упрощающие подбор диаметра отверстия жиклера регулировочного винта, основываясь на скоростях потока воздуха в характерных сечениях воздушных каналов.

5. В ходе натурных испытаний установлено, что на поверхности рельса после подачи песка под колеса локомотива образуются две отличные фракции частиц – слой плотноупакованных частиц на центральной части дорожки катания, и представляет собой след от перемещения колеса по рельсу в габарите пятна контакта с размером зерен менее 0,1 мм, а также неуплотненный – соответствующий размеру частиц исходного песка от 0,1 до 0,5 мм, еще не участвовавших в процессе трения, располагающийся ближе к боковым граням головки рельса. По результатам лабораторных исследований, получено процентное соотношение концентрации частиц песка на поверхности рельса после прохода движущих колес локомотива, и также установлено, что зерна песка данных фракций оказали положительное влияние на повышение коэффициента трения.

6. Определен диапазон рекомендуемого расхода количества песка на погонный метр пути в зависимости от различных факторов с целью повышения и стабилизации сцепных свойств ТПС для предотвращения избыточного проскальзывания движущих колес с рельсами в режимах тяги и торможения, а также аналитически определена эффективность пескоподачи на основе математической модели движения поезда с учетом возможности плавного непрерывного регулирования количества песка на основе алгоритмов «нечеткой логики» в зависимости от фактических условий эксплуатации и нагруженности по сцеплению локомотива.

7. Предложен способ дозирования количества песка под колеса локомотива, основанный на применении эффекта виброоживления слоя частиц кварцевого песка для реализации плавного непрерывного дозирования количества песка за счет изменения частоты, амплитуды и величины возмущающего ударного воздействия на слой сыпучего материала в корпусе форсунки песочницы, а также на разработанных лабораторных установках экспериментально подтверждены эффективность и устойчивость работы данной системы пескоподачи при внешнем вибрационном воздействии, которое имитирует колебания рельсового экипажа.

8. Разработана и подтверждена вычислительным экспериментом на основе трехмерного твердотельного моделирования конечными объемами усовершенствованная система пескоподачи с эффектом виброоживления слоя частиц кварцевого песка для плавного непрерывного дозирования его количества из корпуса форсунки песочницы за счет изменения частоты вибрационного воздействия через латексную мембрану поршнем пневматического пульсатора в зависимости от давления сжатого воздуха, подводимого к пневмоприводу, при увеличенной скорости истечения песковоздушной смеси для обеспечения ее устойчивого истечения из выходного сечения подсыпного рукава путем эжекции дополнительного

объема воздуха через газоздушный инжектор, установленный перед форсункой песочницы, с возможностью реализации продувки пескопровода из-за обеспечения раздельного независимого питания пневматического вибропривода форсунки и газоструйного аппарата.

9. Результаты исследований испытаны и внедрены в ООО «ПК Новочеркасский электровозостроительный завод», Северо-Кавказской дирекции тяги – Дирекции тяги – филиале ОАО «РЖД», Ростовском электровозоремонтном заводе – филиале АО «Желдорремаш».

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме данной работы

Предложенные технические решения по совершенствованию систем пескоподдачи способствуют улучшению эксплуатационных показателей основных пескоподающих устройств и системы в целом, а также положительно сказываются на повышении эффективности применения кварцевого песка для увеличения и стабилизации величины сцепления движущих колес с рельсами при сокращении расхода сжатого воздуха из пневматической питательной магистрали локомотива.

Плавное непрерывное регулирование количества песка из корпуса форсунки песочницы на основе алгоритмов «нечеткой логики» с применением такого физического явления, как виброоживление слоя частиц кварцевого песка, при дальнейших исследованиях имеет перспективу расширения функциональных возможностей алгоритмов управления при оборудовании подвижного состава комплексом датчиков для прогнозирования величины статического коэффициента трения на поверхности рельсов с учетом фактических условий эксплуатации, а также обладает потенциалом, направленным на оптимизацию конструкции пневматического привода вибропульсатора для его разработки и проектирования с техническими характеристиками, такими как частота и сила вибрационного воздействия на слой сыпучего материала, учитывающими требования, предъявляемые к расходу количества песка пескоподающими системами при динамично меняющихся условиях нагруженности по сцеплению и специфике локомотивов различного типа и назначения в режимах тяги и торможения.

Основные публикации по теме диссертации.

Содержание диссертации опубликовано в 44 печатных работах (приведенных в списке литературных источников в диссертации), основными из которых:

Публикации в центральных изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ, международные базы данных и систем цитирования Scopus и Web of Science – 16 работ

1. **Коновалов, П. Ю.** Технические решения по регулированию увеличения скорости управляемого истечения песковоздушной смеси / П. Ю. Коновалов, И. А. Яицков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1(89). – С. 241-247.

2. **Konovalov, P. Y.** Increasing the outlet flow velocity of the locomotive sand feeding system using ejecting / P. Y. Konovalov and Y. P. Bulavin // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2503. – P. 050032.

3. **Konovalov, P.** Control of the Sand Feeding System Operation as a Reserve for Improving the Adhesion Properties of the Traction Rolling Stock. / P.Y. **Konovalov, Y.P.** Bulavin, I.V. Volkov // Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. Springer. – 2022. – Vol. 509. – P. 95-104.

4. Булавин, Ю. П. Исследование особенностей транспортировки песковоздушной смеси с учетом местных сопротивлений трубопровода / Ю. П. Булавин, **П. Ю. Коновалов** // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3(87). – С. 26-35.

5. Булавин, Ю. П. Экспериментальное исследование работы модернизированной форсунки песочницы в условиях вибрации / Ю. П. Булавин, **П. Ю. Коновалов**, И. В. Волков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1(85). – С. 8-15.

6. Bulavin, Y. P. Models of Locomotive Traction Drives for the Improvement of Sand Feeding System / Y. P. Bulavin, **P. Y. Konovalov**, I. V. Volkov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 666. – P. 042089.

7. Булавин, Ю. П. Стендовые испытания модели модернизированной форсунки песочницы с эффектом виброожижения при непрерывной дозированной пескоподаче / Ю. П. Булавин, **П. Ю. Коновалов**, И. В. Волков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(82). – С. 25-31.

8. **Коновалов, П. Ю.** Улучшение противобуксовочных свойств транспортных машин на основе модернизации пневмопривода песочной системы / П. Ю. Коновалов, Ю. П. Булавин, И. В. Волков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(81). – С. 8-19.

9. Analysis of the pneumatic actuator of traction machines sand feeding system when the sand-air mixture flows out / **P. Y. Konovalov**, Y. P. Bulavin, I. V. Volkov, I. A. Yaitskov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 971.– P. 042031.

10. Анализ выходных характеристик пневмопривода системы пескоподачи транспортных машин / **П. Ю. Коновалов**, Ю. П. Булавин, И. В. Волков, И. А. Яицков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 242-253.

11. Improving the pneumatic actuator of the locomotive sand feeding system by increasing the outlet flow velocity / Y. P. Bulavin, **P. Y. Konovalov**, I. V. Volkov, O. N. Bessarabova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 971. – P. 042032.

12. **Коновалов, П. Ю.** Моделирование локомотивной системы дозированной подачи песка на основе нечеткой логики с учетом работы тягового привода в различных условиях эксплуатации / П. Ю. Коновалов, Ю. П. Булавин, И. В. Волков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3(79). – С. 8-20.

13. **Konovalev, P. Yu.** Analysis of granular materials vibrorheology of a railway sanding system / P. Yu. Konovalev, Yu. P. Bulavin, I. V. Volkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709(2). – P. 033093.

14. **Коновалов, П. Ю.** Расширение функциональных возможностей форсунки песочницы пневматической системы пескоподачи локомотивов / П. Ю. Коновалов, Ю. П. Булавин, И. В. Волков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1(77). – С. 75-82.

15. **Коновалов, П. Ю.** Совершенствование пневматической системы пескоподачи электровозов внедрением дросселирующих устройств с сервоприводом / П. Ю. Коновалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1(77). – С. 25-33.

16. Волков, И. В. Применение метода Монте-Карло для анализа сцепных свойств электровозов на основе погодных-климатических данных / И. В. Волков, **П. Ю. Коновалов** // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 2(46). – С. 57-66.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве

В перечисленных ниже работах автору принадлежат следующие результаты: анализ отечественного и зарубежного многолетнего опыта реализации технических решений и алгоритмов управления в системах пескоподачи рельсового транспорта в зависимости от различных условий эксплуатации, обобщение полученных результатов путем классификации [8, 10, 11, 12, 14-16]; разработка программ и методик лабораторных, стендовых и натурных испытаний, создание стендов и установок, участие в проведении испытаний и опытов, обработка и объяснение результатов исследований [5, 7, 13, 15]; постановка задачи вычислительных экспериментов, определение начальных условий, выбор расчетных моделей, решение уравнений, формулирование и анализ результатов [2-4, 6-8, 10-13, 14-16]; идеи технических решений, разработка моделей, алгоритмов реализации и вариантов конструкции [1, 2, 5, 7, 11, 14, 15].

Коновалов Павел Юрьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕСКОПОДАЧИ ЛОКОМОТИВОВ И УЛУЧШЕНИЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 26.06.2023. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,39.
Тираж 100 экз.

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2, www.rgups.ru