



На правах рукописи

КОРЧАГИН Вадим Олегович

УЛУЧШЕНИЕ ТЯГОВЫХ КАЧЕСТВ ТЕПЛОВОЗОВ
ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА
КОНТАКТ ТРИБОСИСТЕМЫ КОЛЕСО – РЕЛЬС

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

МОСКВА – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ) на кафедре «Тяговый подвижной состав»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент,
почётный работник высшего
профессионального образования РФ
ВОРОБЬЁВ Владимир Иванович

Официальные оппоненты:

БУЙНОСОВ Александр Петрович
доктор технических наук, профессор
кафедры «Электрическая тяга»
ФГБОУ ВО «Уральский государственный
университет путей сообщения»

ЛУНИН Андрей Александрович
кандидат технических наук,
заместитель заведующего отделением
«Отделение динамики и прочности,
подвижного состава и инфраструктуры»
АО «ВНИКТИ»

Ведущая организация:

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Петербургский
государственный университет путей
сообщения Императора Александра I»
(ФГБОУ ВО ПГУПС)

Защита диссертации состоится 28 февраля 2018 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.miiit.ru.

Автореферат разослан «___» января 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Железнодорожный транспорт в большинстве стран занимает ведущее место среди других видов транспорта. Провозная способность железной дороги существенно зависит от степени использования мощности локомотивов при работе в режиме «тяга». Работа локомотивов в полную мощность возможна лишь при движении по подъёму со скоростями более расчётной, когда масса состава соответствует весовым нормам участка. При разгоне полное использование тяговой мощности у большинства локомотивов ограничивается их сцепными свойствами, недостаточность сцепления действует в широком диапазоне скоростей.

Тяговые возможности локомотива главным образом формируются величиной осевых нагрузок и коэффициентом сцепления. Коэффициент сцепления определяется трибологическими процессами, происходящими в пятне контакта колеса с рельсом. На величину коэффициента сцепления влияет скорость перемещения пятна контакта, состояние и форма контактируемых поверхностей, передаваемые усилия. Падающие осенние листья, роса, осадки, иней, наледь, морось, грязь, плёнки жидкости на поверхностях колеса и рельса приводят к существенному снижению сцепления. Отечественный и зарубежный опыт эксплуатации показывает, что коэффициент сцепления колёс подвижного состава с рельсами изменяется в широких пределах – от 0,1 до 0,6. В условиях повышения веса поездов, мощности тягового привода современных локомотивов и ограниченной нагрузки колёсных пар на путь возникает необходимость в увеличении коэффициента сцепления.

Многочисленные исследования показывают, что в основе сцепления колёс железнодорожного подвижного состава с рельсами лежит фрикционное взаимодействие в зоне контакта, а коэффициент сцепления существенно зависит от величины коэффициента трения. Актуальность исследований по управлению трением в системе колесо – рельс подтверждается рядом принятых Правлением ОАО «РЖД» нормативных документов: «Стратегией научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года», «Энергетической стратегией холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года».

Степень разработанности темы. Современное представление о взаимодействии колеса с рельсом базируется на достижениях в механике, физике, химии, трибологии, триботехнике, материаловедении и других науках. Работы отечественных и зарубежных исследователей Ф.П. Боудена, А.П. Буйносова, Д.Н. Гаркунова, Н.Б. Демкина, Б.В. Дерягина, И.П. Исаева, А.Ю. Ишлинского, Д.Д. Калкера, В.С. Косова, И.В. Крагельского, Ю.М. Лужнова, Д.К. Минова, Д.Ю. Погорелова, Г.И. Петрова, Г.В. Самме, Д. Тейбора и др. позволили решить обширный круг задач, относящиеся к сцеплению колеса с рельсом. В настоящее время наиболее распространённым способом обеспечения устойчивого сцепления колёс с рельсами является использование песка. Его применение приводит к загрязнению и снижению электрического сопротивления балласта, повышению износа узлов и деталей. Возникает потребность в пунктах экипировки песком, инерционность механизма подсыпки не позволяет предотвратить начало буксования, ограничено использования песка на стрелочных переводах.

Объектом исследования является повышение надежности сцепления тепловозных колёс с рельсами при работе в режиме «тяга».

Предметом исследования является зона контакта колеса и рельса.

Цель работы. Разработка и совершенствование научно обоснованных методов и способов улучшения тяговых качеств тепловозов воздействием постоянного магнитного поля на контакт колёс с рельсами.

Задачи исследования:

- разработать и изготовить установки для изучения эффекта влияния магнитного поля на взаимодействие стальных пар трения, получить экспериментальные данные по влиянию постоянного магнитного поля на трение образцов из стали;

- определить для режимов начального и полного насыщения параметры магнитного поля в зоне контакта;

- установить геометрические параметры контактного взаимодействия колеса и рельса, разработать и реализовать алгоритм определения площади контакта колёс локомотива с рельсами, дать математическое описание критериям конформности контакта колеса и рельса, выполнить аппроксимацию профиля рабочих поверхностей колеса;

- установить зависимость магнитного поля в зоне контакта от поперечного положения колёсной пары в рельсовой колее для новых и изношенных профилей;

- предложить патентоспособные решения для практического использования результатов исследования на тяговом подвижном составе, выбрать места расположения индукторов;

- определить эксплуатационные режимы намагничивания зон контакта колёс тепловоза с рельсами для улучшения сцепления при работе в режиме «тяга»;

- провести испытания маневрового тепловоза ЧМЭЗ с опытным образцом индукторного устройства увеличения сцепления колёс с рельсами.

Научная новизна заключается в следующих результатах.

- Для оценки эффективности намагничивания зоны контакта колеса с рельсом предлагается использовать **коэффициент магнитного перекрытия контакта колеса с рельсом** в виде отношения площади магнитного контакта к площади контактного пятна. За **магнитный контакт колеса с рельсом** принимается область насыщения на поверхности катания колеса с индукцией магнитного поля больше индукции начального насыщения материала стали.

- Разработана **математическая модель** профиля колеса в виде тригонометрического ряда Фурье.

- Изучено распределение магнитного поля в зоне контакта колеса с рельсом, определены способы организации магнитного потока на локомотиве при использовании устройств с магнитными усилителями коэффициента сцепления. На указанные устройства получены **патенты РФ**.

- Написана программа для ЭВМ, которая определяет **макрогеометрические параметры зоны контакта** колеса с рельсом, получено свидетельство о государственной регистрации.

- Определены **режимы намагничивания** зон контакта колёс шестиосного маневрового тепловоза с рельсами при тяге на малых скоростях.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- изготовленные трибометрические установки и устройства позволяют экспериментально изучать влияние магнитного поля на коэффициент трения, при этом воссоздаются процессы, приближённые к процессам в системе колесо – рельс;
- применён адаптированный для условий эксплуатации способ выявления степени конформности контакта колеса с рельсом, заключающийся в определении ширины и площади контактного пятна;
- получены зависимости изменения площади контакта колёс с рельсами от поперечного положения колёсной пары в колее, позволяющие для новых и изношенных профилей учитывать магнитное сопротивление зоны контакта и определять эффективность режимов намагничивания;
- внесены предложения практического использования результатов исследования на тяговом подвижном составе: выбраны места расположения индукторов, приведены режимы работы индукторов и мощности, потребляемые устройствами увеличения сцепления, указанные устройства защищены патентами.

Методология и методы исследования.

Методологической основой работы является системный подход к изучению поведения трибоконтакта стальных пар трения при воздействии магнитного поля. Экспериментальные исследования проводились с использованием средств контроля и обработки данных на ПЭВМ. Теоретические исследования базируются на современных представлениях о контактном взаимодействии твёрдых тел, достижениях в области расчёта магнитных полей, а также широком применении математических методов. Математическая модель взаимодействия профиля колеса и рельса разработана с использованием дифференциального и интегрального исчисления, технологий объектно-ориентированного программирования. Применялись современные системы моделирования, параметры магнитного поля определялись в конечноэлементном пакете ANSYS Maxwell, исследования взаимодействия колёс локомотива с рельсами проводились в модуле UM Loco программного комплекса «Универсальный механизм». Часть исследований выполнялась в программе, написанной автором.

Положения, выносимые на защиту:

- обоснование использования разработанных трибометрических установок и устройств при изучении эффекта влияния магнитного поля на взаимодействие стальных пар трения;
- оценка влияния поперечного положения колёсной пары в рельсовой колее, а также износа профилей на магнитное поле в зоне контакта;
- аппроксимация профиля колеса, анализ взаимодействия колеса с рельсом, путём сопоставления уравнений профилей и их производных;
- программа для определения макрогеометрических параметров зоны контакта колеса с рельсом;
- патентоспособные решения для использования результатов исследования на тяговом подвижном составе, выбор мест расположения индукторов;
- обоснование режимов намагничивания зон контакта колёс с рельсами при работе маневрового шестиосного тепловоза в тяге на малых скоростях.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается:

- сравнением расчётных данных с экспериментальными;
- сравнением результатов исследования с данными, опубликованными другими авторами;
- корректным применением обоснованных методов научного исследования, использованием основных положений дифференциального и интегрального исчисления, теории упругости, аналитической геометрии и теории тяги поездов;
- использованием общепризнанных программных комплексов.

Апробация результатов. Результаты работы и её отдельные положения были представлены в сборниках научных трудов: «Совершенствование транспортных машин» (Брянск, 2017 г.); «Повышение эффективности транспортных машин» (Брянск, 2017 г.); докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: Всероссийской студенческой научно-технической конференции «Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники. Инженерные идеи XXI века» (Воронеж, 2010 г.); Международной научно-практической конференции «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия» (Новосибирск, 2015 г.); Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» (Омск, 2016 г.); Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг-2017» (Санкт – Петербург, 2017 г.) и заседаниях кафедры «Тяговый подвижной состав» РУТ (МИИТ) (Москва, 2016-2017 гг.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 35 печатных работах. Четыре статьи – в изданиях, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций» («Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» № 1 (309), 2015 г., «Вестник Брянского государственного технического университета» № 4 (52), 2016 г. и № 2 (55), 2017 г., «Наука и техника транспорта» № 2, 2017 г.). Результаты исследования вошли в две монографии и одно учебное пособие, получено десять патентов РФ № 156444, № 163519, № 167614, № 167616, № 171080, № 171138, № 172435, № 172579, № 172641, № 173552 и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617934, две заявки на патенты РФ находятся на этапе рассмотрения.

Объем и структура. Диссертация состоит из содержания, введения, пяти разделов, заключения с изложением основных результатов и выводов, списка использованных источников из 177 наименований и приложений. Материалы диссертации содержат 134 страницы основного текста, 62 рисунка, две таблицы и четыре приложения на 41 странице.

Автор выражает признательность за плодотворное обсуждение и ценные замечания профессорско-преподавательскому составу кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта (МИИТ), кафедры «Подвижной состав железных дорог» и специалистам лаборатории «Вычислительной механики» Брянского государственного технического университета, а также сотрудникам компании «Делкам-Урал».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражены актуальность и степень разработанности темы, поставлены цели и задачи, выбраны методы проведения исследований, изложены научная новизна, основные положения и практическая ценность работы, показаны достоверность результатов и степень апробации.

В **первом разделе** выполнен анализ работ, посвящённых влиянию магнитного поля на физико-механические свойства металлов, рассмотрены модели контактирования и способы повышения сцепления железнодорожного колеса с рельсом.

Картина эксплуатационного взаимодействия колеса с рельсом сложна и разнообразна, влияние оказывают множество факторов, среди них: режим работы, скорость, погодные условия, техническое состояние подвижного состава и пути. Вместе с тем, трение тел сопровождается явлениями, имеющими механическую, химическую, электрическую, магнитную и тепловую природу.

Повышение сцепных свойств в паре колесо локомотива – рельс основывается на следующих принципах: использование в зоне контакта третьего тела, изменение силы прижатия колеса к рельсу догрузением колёсной пары и перераспределением осевых нагрузок, распределение между осями тяговых усилий, изменение геометрии контактирующих тел, влияние на условия прохождения криволинейных участков пути, изменение состояния зоны контакта колеса с рельсом воздействием физических полей. Большинство из распространённых методов повышения сцепления колёс железнодорожного подвижного состава с рельсами обладают существенными недостатками. Для научно-технических коллективов остаётся актуальной задача исследования области контакта колеса и рельса с целью управления трением.

В развитие науки контактного взаимодействия тел свой вклад внесли Н. Hertz, J. Frenkel, М. Brillouin, Р. Woog, W.B. Hardy, Б.В. Дерягин, Д.А. Гринвуд, Д.Н. Гаркунов, И.В. Крагельский, И.Г. Горячева, Н.Б. Демкин, Н.М. Михин, Э.В. Рыжов и др. На сегодняшний день среди российских и зарубежных специалистов в области контактного взаимодействия тел общепризнанным фактом является то, что не существует абсолютно упругого взаимодействия тел. Между твёрдыми телами контакт всегда дискретен, в нагруженном контакте возникают неупругие процессы пластической деформации. Как правило, неупругость стальных тел проявляется на микроскопическом и субмикроскопическом уровне, в целом наблюдается макроскопическая упругость.

На сегодняшний день, наряду с пластической деформацией материала, температурной обработкой, обработкой электрическим током, широкое развитие получило электромагнитное и магнитное воздействие. Магнитное поле способно воздействовать на углубленном (электронном, ядерном) уровне. Находящиеся в узлах кристаллической решётки атомы, под воздействием внешней энергии оставляют вакансию и занимают межузловое положение. К главным преимуществам магнитной обработки можно отнести: возможность дистанционного бесконтактного намагничивания, простота и универсальность оборудования, высокая скорость протекания процесса.

Первые исследования по изменению свойств металлов намагничиванием относятся к 30 годам XX века. Гипотеза о влиянии магнитного поля получила развитие в последующие годы, применительно к инструментальной стали. Влиянию магнитных полей на прочность и пластичность металлов посвящены работы научно-исследовательских коллективов под руководством ряда учёных: В.И. Альшица, В.Е. Громова, В.И. Данилова, Л.Б. Зуева, М.И. Каганова и др.

Влияние магнитного поля на взаимодействие стальных пар трения изучалось Д.В. Воробьёвым, Л.Г. Делюсто, Ю.М. Лужновым, В.П. Тихомировым и др. Ряд исследований напрямую относятся к сцеплению колеса с рельсом, есть и такие, которые описывают схожие физические процессы. Результаты опытов показывают, что воздействие магнитного поля на контакт стальных пар трения повышает коэффициент и силу трения, следовательно, может быть повышен и коэффициент сцепления колеса с рельсом. Ранее эта идея проверялась на паровозах серии СО и электровозах ВЛ23. Испытания тепловоза ТЭМ2-1983 с электромагнитным устройством повышения сцепления, размещённом на тележке, проводились в 1976 году. После этого в 1978 году Брянский машиностроительный завод изготовил тепловоз ТЭМ2УС-001 с тележками, оборудованными электромагнитами. Испытания тепловоза проходили без исследования магнитных цепей тележек.

Во втором разделе приведено описание трибометрических установок, представлены результаты экспериментальных исследований влияния постоянного магнитного поля на коэффициент трения образцов из стали, определены характеристики магнитного поля, получена зависимость коэффициента трения от магнитного поля в зоне контакта. Обосновано использование инденторного устройства при исследовании молекулярной составляющей коэффициента трения.

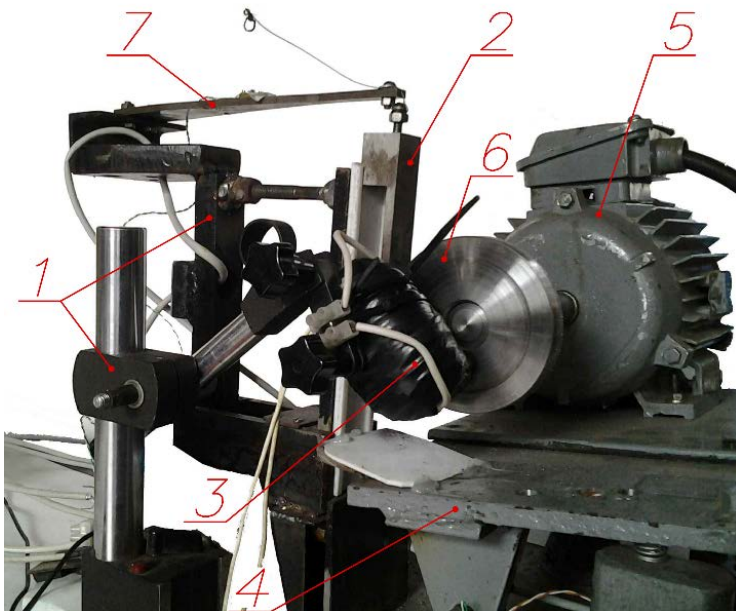


Рисунок 1 – Установка для исследования трибологических характеристик в условиях трения качения со скольжением при воздействии магнитного поля

Экспериментальная часть проводится на установке (рисунок 1), которая включает индуктор с обмоткой 3, колесо 6, прижатое к рельсу 2. Индуктор состоит из двух катушек 140 и 200 витков, намотанных во взаимно перпендикулярных плоскостях на П-образный магнитопровод. Колесо представлено цилиндром диаметром 75 мм и высотой 10 мм, приводится во вращение электродвигателем 5. Электродвигатель размещён на поворотной платформе 4. Рельс выполнен брусом прямоугольного сечения, прижат к стойке 1 через прокладку с низким коэффициентом трения.

Рельс соединён с тензобалкой 7, на которой расположен тензодатчик, регистрируемые усилия передаются на тензометрическую станцию (на рисунке не показана) в виде сигнала. Тензометрическая станция усиливает сигнал и передаёт через интерфейс на персональный компьютер, там данные преобразуются в графический вид, рисунок 2.

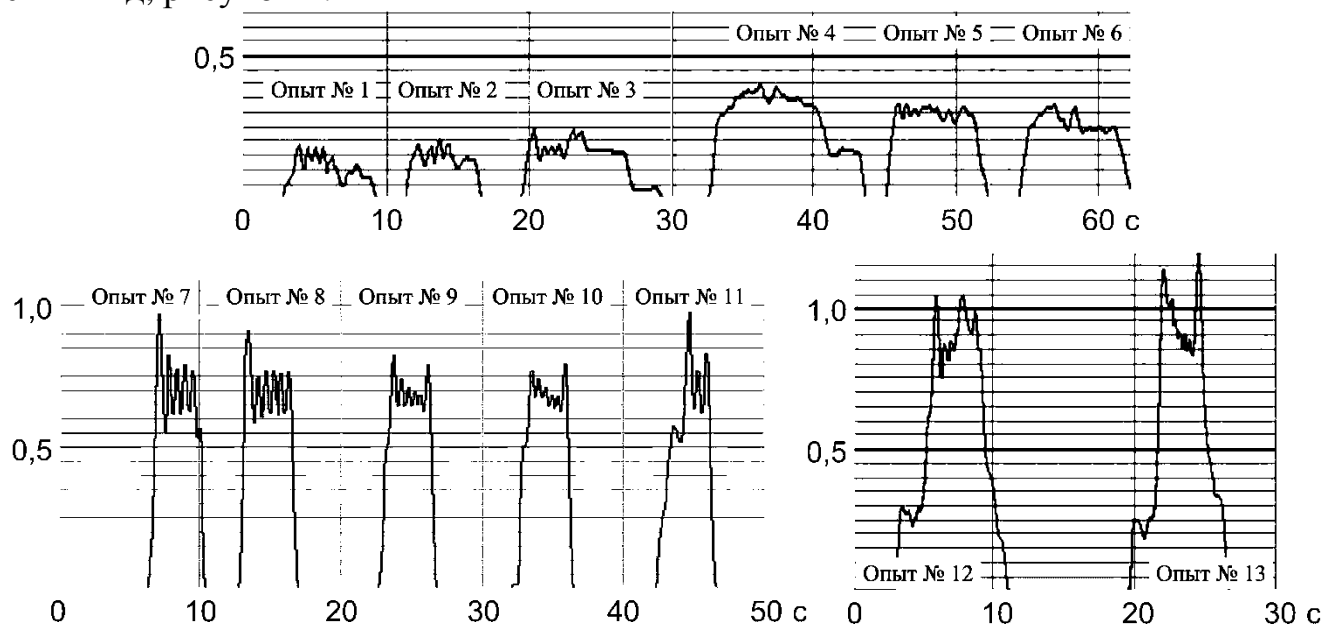


Рисунок 2 – Осциллограммы изменения сил трения (относительные единицы)

В процессе эксперимента воссоздавалась потеря сцепления колеса с рельсом и срыв в буксование, при этом искажалась регистрируемая сила трения. Опыты № 1-3 выполнялись без намагничивания зоны контакта колеса с рельсом, в последующих опытах № 4-11 выполнялось плавное намагничивание зоны контакта. Опыты № 12 и 13 проводились при насыщении стали в зоне контакта колеса с рельсом. Образцы изготовлены из стали, используемой при производстве бандажей колесных пар, и Ст3. Опыты № 1, 2, 6, 9, 10, 11, 12 проводились с использованием бандажной стали, в опытах № 3, 4, 5, 7, 8, 13 использовалась Ст3.

Опыты показывают, что пропускание магнитного потока через зону контакта колеса с рельсом вызывает увеличение силы трения на величину ΔF . Магнитная энергия в воздушном зазоре создаёт силу электромагнитного притяжения ΔN . Прижатие колеса к рельсу без намагничивания N и при намагничивании $N + \Delta N$ определяется с помощью динамометра. Догружение колеса ΔN зависит от индукции, напряжённости магнитного поля в зоне контакта и площади.

Сопоставление экспериментальных данных в виде отношения силы трения к силе прижатия выявляет разницу в коэффициентах трения. При отсутствии магнитного поля коэффициент трения соответствует μ , в условиях намагничивания он возрастает на величину $\Delta\mu$. В режиме начального насыщения стали в зоне контакта колеса с рельсом коэффициент трения повышается на 13 %, при полном насыщении – на 22 %. Зависимость относительного изменения коэффициента трения от индукции магнитного поля B имеет квадратично – кубический вид, рисунок 3.

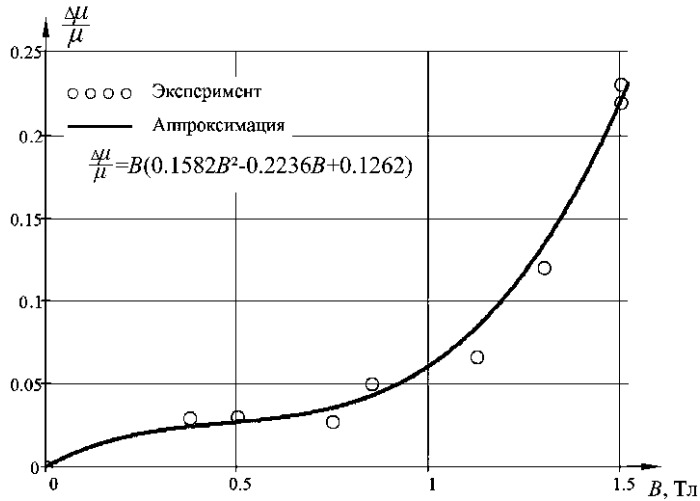


Рисунок 3 – Зависимость относительного изменения коэффициента трения от индукции магнитного поля

Исследования И.В. Крагельского объединяют адгезионные и деформационные процессы в молекулярно-механическую теорию трения. Силу трения И.В. Крагельский представляет суммой механической и молекулярной составляющих. Коэффициент трения μ также складывается из механической $\alpha S_{\phi}/N$ и молекулярной β компонент, является функцией площади контакта S_{ϕ} и давления, а также зависит от молекулярной адгезии поверхностей $\mu = \alpha S_{\phi}/N + \beta$.

Шариковые трибометры позволяют измерить коэффициент трения. Для гладких поверхностей шара и плоскости площадь контакта мала, механическая составляющая коэффициента трения незначительна, преобладает молекулярная составляющая $\beta \approx \mu$.

Для определения молекулярной составляющей коэффициента трения при воздействии магнитного поля изготовлено одношариковое инденторное устройство, рисунок 4 а. Устройство является активным, содержит обмотку из 112 витков медного провода, создающую намагничивающую силу. Полированный стальной шар впрессован в алюминиевый корпус устройства. Корпус сверху и снизу закрыт стальными дисковыми обоями, которые образуют паз для обмотки.

Изготовленная на основе сверлильного станка установка оснащена инденторным устройством, рисунок 4 б. На станине 3 установлена опора 2 с диском 4, текстолитовым держателем 6 и образцом 5. На образце размещено одношариковое инденторное устройство 1. В патроне 8 через парамагнитную прокладку закреплён нагрузочный диск 7, который прижимает индентор к образцу. Прижатие осуществляется путём приложения постоянного усилия к шпинделю. Ток обмотки инденторного устройства контролируется амперметром, рисунок 4 в.

Сила индентору сообщается через нерастяжимую нить, один конец которой намотан поверх обмотки, а второй перекинут через неподвижный блок. Натяжение нити осуществляется при помощи аптечных гирь весом G . Для исключения значительного перекоса индентора центр шара и верх блока расположены на одном уровне.

Прирост силы трения на величину ΔF это результат суммарного влияния от магнитного догружения ΔN и изменения триботехнических свойств узла трения $\Delta\mu$, воздействие которых накладывается на прижатие N и коэффициент трения μ без магнитного поля. В зависимости от типа установки, а также конструктивных особенностей узла трения, в выражении (1) преобладает первое или последнее слагаемое.

$$\Delta F = \mu \cdot \Delta N + \Delta\mu \cdot \Delta N + \Delta\mu \cdot N. \quad (1)$$



а – одношариковое инденторное устройство;

б – расположение индентора на установке;

в – общий вид установки

Рисунок 4 – Установка для исследования молекулярной составляющей коэффициента трения

Шар индентора зажимается между образцами силой N , через контакты шара с нижней и верхней плоскостями проходит вертикальная ось вращения. Поскольку площадь контакта шара с плоскостью мала, то сила электромагнитного догружения незначительна, при полном насыщении контакта её наибольшее значение не превышает 0,1 Н. Догружением ΔN можно пренебречь в тех случаях, когда $N \gg \Delta N$, при этом выражение (1) упростится $\Delta F = \Delta \mu \cdot N$. При $N = \text{const}$ весь прирост силы трения ΔF обусловлен увеличением коэффициента трения за счёт молекулярной составляющей $\Delta \beta \approx \Delta \mu$.

При отсутствии намагничивающего тока индентор приводится в движение после приложения к нити силы $G = 7,9$ Н, рисунок 5. Намагничивание контакта шара индентора со стальными пластинами способствует повышению силы, необходимой для вывода индентора из состояния равновесия. Поскольку нахождение индентора в равновесии объясняется трением, то увеличение силы G свидетельствует о приросте силы трения. Таким образом исследовалось изменение коэффициента трения между стальными образцами при воздействии на контакт магнитного поля.

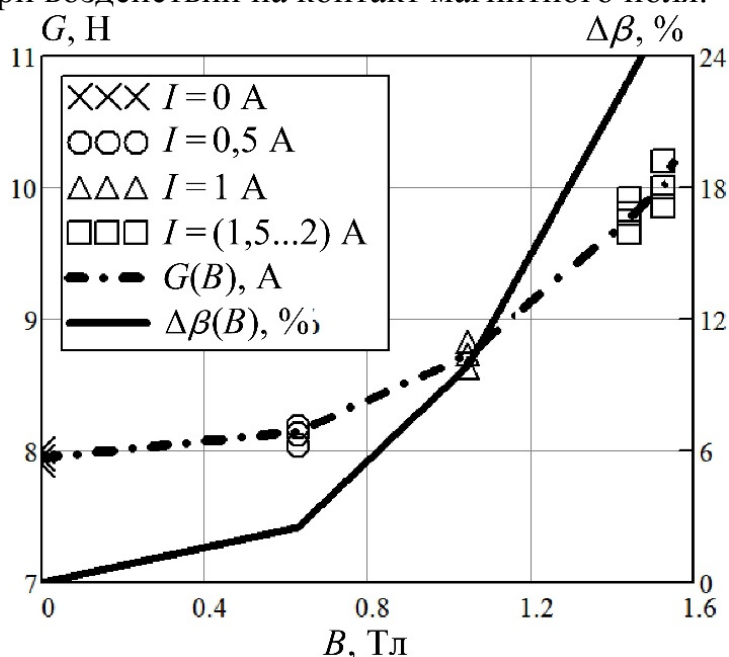


Рисунок 5 – Изменение силы натяжения нити и коэффициента трения от магнитной индукции в зоне контакта

Использование одношарикового инденторного устройства позволяет достичь скорейшего насыщения стали, поскольку основной магнитный поток шара стягивается в область контакта. Эффективность намагничивания повышается за счёт расположения обмотки в непосредственной близости от зоны контакта шара и образца, а также использования материалов с различной магнитной проницаемостью. Насыщение зоны трения наступает при индукции величиной 1,3 Тл, магнитодвижущая сила (МДС) катушки в момент насыщения составляет 90 А-витков.

В третьем разделе представлены результаты исследований распределения магнитного поля между колесом и рельсом, определены эпицентры концентрации магнитного поля при различных режимах намагничивания с учётом изменения положения колеса относительно рельса для новых и изношенных профилей, заданы критерии оценки эффективности намагничивания зоны контакта колеса с рельсом.

В пропускании магнитного потока между колесом и рельсом участвуют рабочие и смежные с ними поверхности. Характерные поверхности колеса и рельса, пронизываемые силовыми линиями поля, и условия распределения магнитного потока на этих поверхностях приведены в таблице 1. Условия подразделяются на геометрические и магнитные, они обуславливают величину магнитного сопротивления зоны контакта колеса с рельсом.

Таблица 1 – Условия распределения магнитного потока между поверхностями

Составные части поверхности		Бандаж локомотивного колеса		
		половина выкружки, гребень	половина выкружки, поверхность катания	фаска, внешняя грань
Головка рельса	половина внутренней выкружки, внутренняя грань головки	малый зазор между гребнем и рельсом при насыщении стали на поверхностях катания; гребневый контакт	насыщение стали на поверхностях катания при положении колеса, близком к центральному	–
	половина внутренней и внешней выкружек, поверхность катания	одноточечный гребневый контакт, разуклонка и отжатие рельса, образование полки износа, всползание гребня	в нормальных условиях основной магнитный поток проходит через эти поверхности (режим нарушается при отрыве поверхности катания и всползании колеса)	ширина колеи, близкая к максимальной, значительный износ гребней, всползание гребня второго колеса
	половина внешней выкружки, внешняя грань головки	–	насыщение стали на поверхностях катания при положении колеса, близком к центральному	значительный зазор между гребнем и рельсом при насыщении стали на поверхностях катания

Из-за перемещения ферромагнитных тел и изменения воздушного зазора возникает геометрическое влияние на магнитное сопротивление зоны контакта. Сопротивление стали сильно зависит от индукция поля, в насыщенных областях колеса и рельса магнитная проницаемость принимает малые значения. Это способствует отклонению магнитного потока, насыщенные области он обходит по более длинной траектории с меньшим магнитным сопротивлением. В зазоре магнитный поток проходит через воздух с постоянной магнитной проницаемостью, поэтому сопротивление зазора главным образом зависит от его протяжённости.

Колесо с рельсом контактируют преимущественно поверхностями катания, поэтому там сосредотачивается большая часть магнитного потока, рисунок 6. Особенно это выражено при значительном зазоре между рельсом и гребнем колеса. Профиль колеса шире головки рельса, эта геометрическая особенность способствует тому, что в нормальных условиях эксплуатации силовые линии могут соединить поверхность катания колеса с любой из трёх рассматриваемых поверхностей рельса. Поток через внешнюю грань колеса относится к потокам рассеяния, внутренние поверхности колёс так же мало задействованы в пропускании магнитного потока. За счёт того, что между колесом и рельсом поддерживается постоянный ферромагнитный контакт, потоки рассеяния незначительны, а весь магнитный поток складывается из потоков, проходящих через поверхность катания и гребень колеса.

При намагничивании зоны контакта колеса с рельсом формируется область с индукцией магнитного поля от 1,3 до 1,5 Тл, превышающей индукцию начального насыщения бандажной стали. Размеры области насыщения, как и максимальная индукция, главным образом зависят от приложенного магнитного напряжения U_M . Магнитное напряжение на участке цепи определяется, путём интегрирования тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля H по контуру обхода l , а магнитный поток Φ рассчитывается интегрированием нормали вектора магнитной индукции B через поверхность S .

$$U_M = \int_l \vec{H} d\vec{l}, \quad \Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}. \quad (2)$$

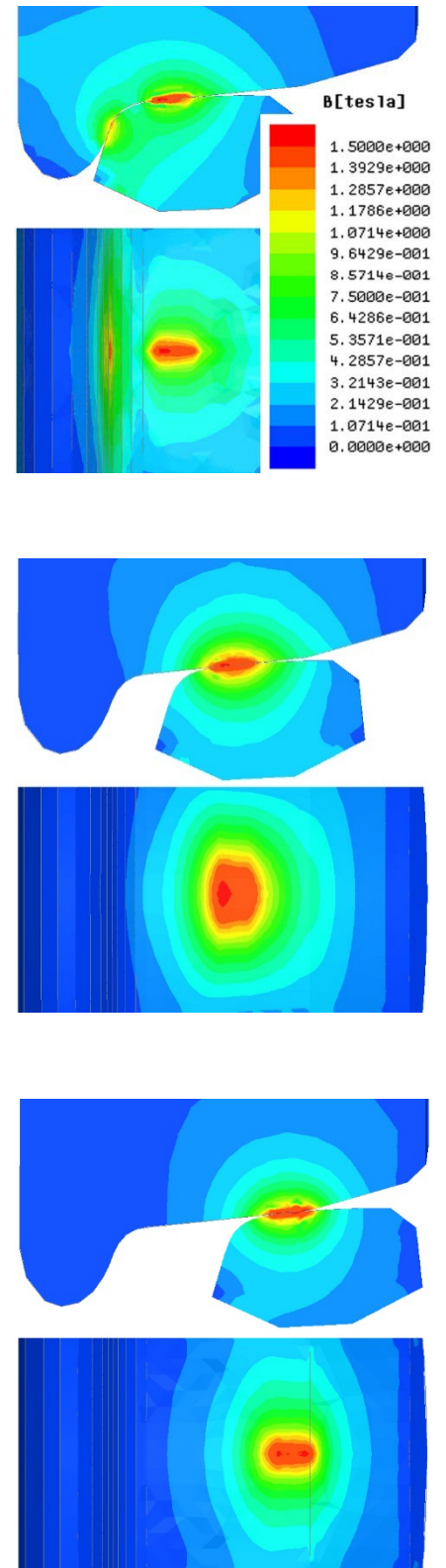


Рисунок 6 – Распределение магнитного поля между новым колесом и изношенным рельсом ($U_M=257$ А)

При наличии зазора между гребнем колеса и рельсом 98 % магнитного потока протекает через поверхность катания, при двухточечном гребневом контакте от 30 до 40 % потока переориентируется на поверхности гребня и выкружу. Изучено влияние режима намагничивания и изменение положения колеса относительно рельса на магнитное поле в зоне контакта для трёх режимов намагничивания: ненасыщенное, насыщенное состояние и полное насыщение зоны контакта, рисунок 7.

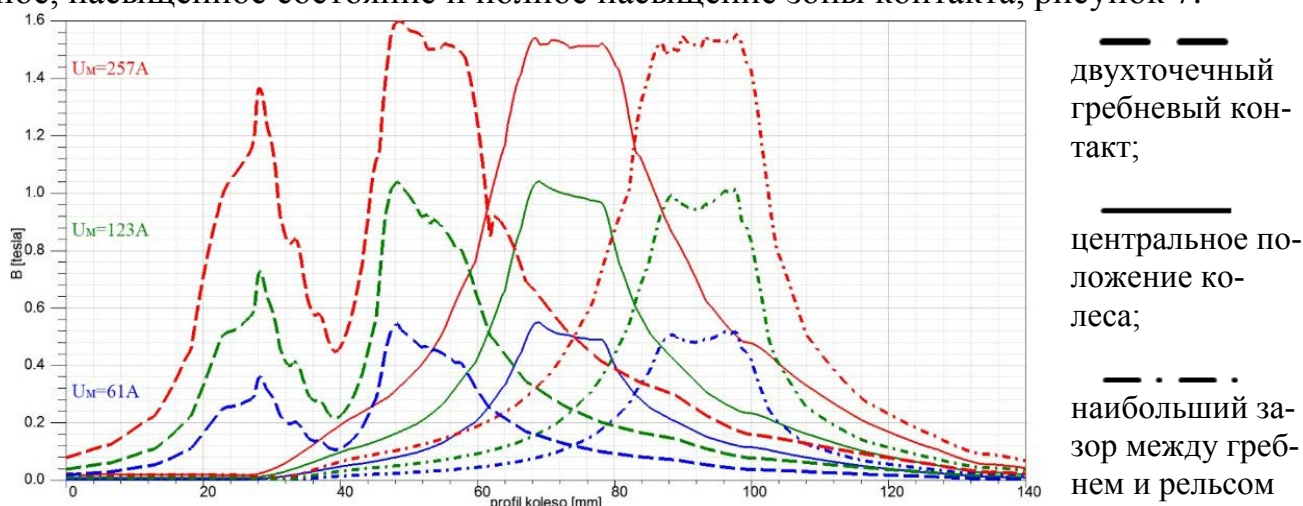
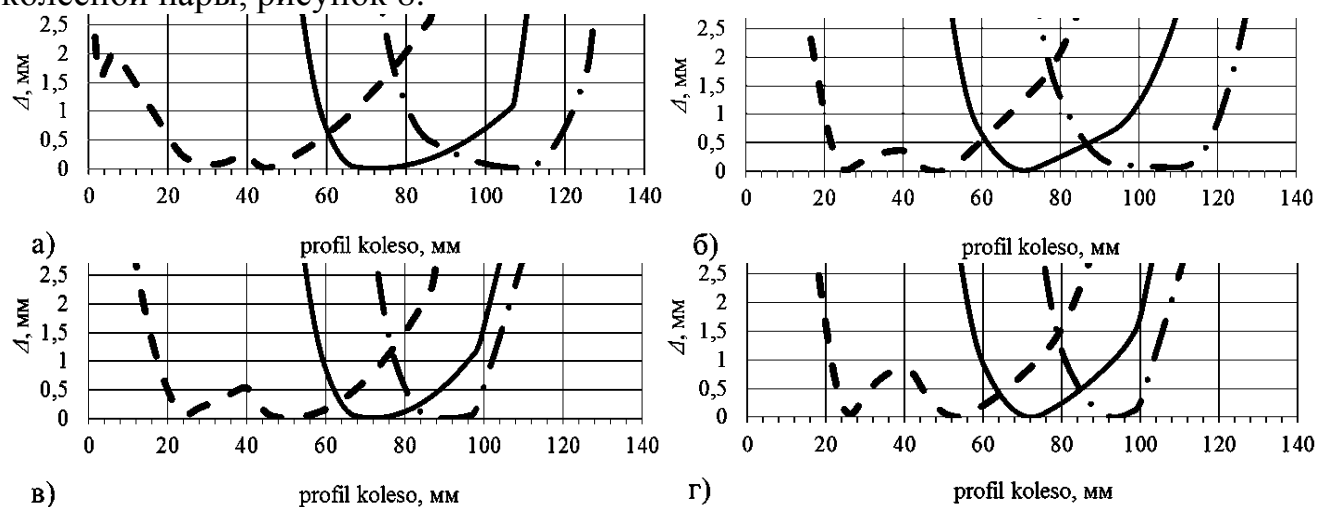


Рисунок 7 – Магнитная индукция (Тл) на поверхности нового колеса при контакте с изношенным рельсом

В первую очередь насыщаются участки пятна контакта колеса с рельсом, это вынуждает силовые линии магнитного поля смещаться за пределы контактного пятна, расширяя область насыщенного магнитного контакта. Очертание области насыщения связано с распределением силовых линий магнитного поля в колесе и рельсе, а так же с изменением магнитного сопротивления. Поскольку магнитное сопротивление главным образом обусловлено воздушным зазором, то зазор оказывает значительное влияние и на формирование области насыщения. Зазор в поперечном сечении зависит от износа колеса и рельса, а также поперечного положения колёсной пары, рисунок 8.



а – изношенное колесо, изношенный рельс; б – изношенное колесо, новый рельс;
в – новое колесо, изношенный рельс; г – новое колесо, новый рельс
— — двухточечный гребневый контакт; — центральное положение колеса;
— . — . наибольший зазор между гребнем и рельсом

Рисунок 8 – Зазор между колесом и рельсом в поперечном сечении

В продольном сечении зазор между колесом и рельсом определяется по формуле $\Delta = a^2/D_K$, где D_K – диаметр колеса, a – половина области насыщения в продольном направлении. Анализ изменения магнитной проницаемости показывает, что магнитное сопротивление увеличивается при удалении от пятна контакта колеса с рельсом.

Границы области насыщения в зоне контакта колеса с рельсом принимают близкую к эллиптической форму. Большая полуось области насыщения может быть направлена как вдоль, так и поперёк оси вращения колеса. При контакте, когда оба профиля новые или изношенные, области насыщения имеют продольную ориентацию. Зоне контакта нового профиля с изношенным свойственно поперечное вытягивание области насыщения.

Вращение области насыщения объясняется тем, что воздушный зазор вокруг контактного пятна изменяется неравномерно. Сопоставление графиков изменения зазора между колесом и рельсом с графиками магнитной индукции показывает, что распределение индукции колеса и рельса имеет обратную зависимость от зазора между телами. Монотонность графиков зазора и индукции меняется в одних и тех же точках на профиле, максимуму индукции соответствует минимум зазора. Соединив последовательно равноудалённые точки на поверхностях колеса и рельса, получим замкнутую границу, на которой индукция принимает постоянную величину.

Приложение магнитного напряжения величиной $U_M = 257$ А насыщает контакт колеса с рельсом и приконтактную область. Граница области насыщения с индукцией 1,3 Тл располагается в пределах зазора между колесом и рельсом величиной от 0,1 до 0,2 мм, при этом в эпицентре области насыщения (пятне контакта) индукция достигает величины 1,5 Тл. Таким образом, пятно контакта на поверхности катания перекрывается областью насыщения.

Под площадью магнитного контакта колеса с рельсом S_M понимается область насыщения на поверхности катания, где индукция магнитного поля больше индукции начального насыщения. Коэффициент магнитного перекрытия контакта колеса с рельсом, в виде отношения площади магнитного контакта к площади контактного пятна S_K , характеризует эффективность намагничивания зоны контакта колеса с рельсом. Случаи, когда площадь магнитного контакта меньше площади контактного пятна ($S_M/S_K < 1$), относятся к неэффективным режимам намагничивания. Такие режимы возникают при крайних положениях нового колеса относительно изношенного рельса, при контакте гребня колеса с рельсом, а так же при $U_M < 123$ А.

Наличие в зоне контакта колеса с рельсом воздушного зазора способствует спрямлению веббер-амперной характеристики. В 50 % рассмотренных контактов магнитное сопротивление зоны контакта составляет от 0,00013 до 0,00015 Гн⁻¹, в 42 % – сопротивление находится в пределах от 0,00008 до 0,0001 Гн⁻¹. Наибольшее магнитное сопротивление 0,00019 Гн⁻¹ наблюдается у 8 % контактов. Если не учитывать положение колеса относительно рельса, а так же особенности износа профилей, то средневзвешенное магнитное сопротивление зоны контакта колеса с рельсом можно принять 0,00012 Гн⁻¹.

В четвёртом разделе для выявления влияния износа и поперечного положения колёсной пары в рельсовой колее на размеры контактного пятна проведено компьютерное моделирование взаимодействия колёс тепловоза с рельсами. Автор благодарит профессора Погорелова Дмитрия Юрьевича за предоставление программного комплекса «Универсальный механизм» для проведения исследований.

Самым массовым маневровым локомотивом в России является шестиосный тепловоз ЧМЭЗ. На первом этапе моделирования для этого локомотива определены площади пятен контакта и поперечные положения колёсных пар при разгоне до 12 км/ч. На втором этапе полученные данные импортировались в Math-lab, где система регулирования задавала намагничивающий ток индукторов для поддержания сцепления. На заключительном этапе в UM Loco повторялся расчёт с заданными значениями коэффициентов трения на поверхностях катания, выкружках и гребнях. Моделирование выполнялось для новых и изношенных профилей, движение происходило в пределах S – образной кривой.

Автором написана «Программа моделирования поперечного положения колёсной пары в колее» с целью определения дополнительных макрогеометрических параметров зоны контакта колеса с рельсом. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617934. Программа использовалась при исследовании контактирования профиля колеса с профилем рельса и определении величины зазора между ними, получены очертания контактного пятна и семейство поперечных положений колёсной пары в рельсовой колее.

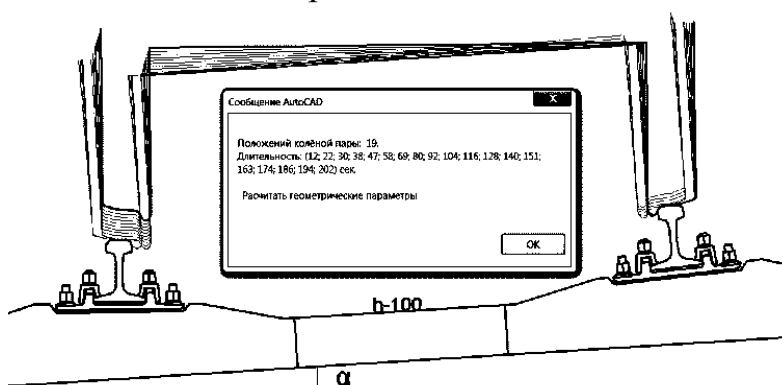
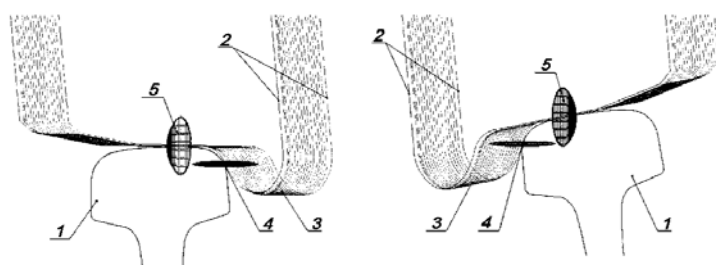


Рисунок 9 – Итерационное определение положения колёсной пары в колее



а) б)
а, б – контакт с левым и правым рельсом;
1 – рельс; 2, 3 – крайние и промежуточные
положения колёс; 4, 5 – пятно контакта на
гребне и поверхности катания

Рисунок 10 – Площадь контакта колеса
с рельсом

Результаты моделирования получили экспериментальное подтверждение путём фиксации на фольге отпечатков контакта колёс тепловоза ЧМЭЗ с рельсами, расхождение значений площади контактного пятна не превышает 10 %.

Положения колёсной пары в колее определяются итерациями плоскопараллельного перемещения профиля колёсной пары относительно профиля левого и правого рельса, рисунок 9. Точечный контакт, посредством смещения координат профиля на величину проникновения, вырождается в область пересечения. Вращение нижней границы области пересечения относительно оси колёсной пары и вытягивание верхней границы в продольном направлении формирует тело контакта, ограниченное поверхностями контакта, рисунок 10.

Было получено аналитическое выражение профиля колеса разложением в тригонометрический ряд Фурье. Для улучшения сходимости расчётных координат с исходными и сглаживания пульсаций использовалась вспомогательная функция, пульсации которой относительно профиля находятся в противофазе к первоначальной аппроксимирующей функции. Анализ взаимодействия профиля колеса с профилем рельса, основанный на сопоставлении уравнений профилей и их производных, показал, что рассчитанные параметры эллиптического контакта хорошо соотносятся с результатами моделирования. Пятно эллиптического контакта, по сравнению с неэллиптическим, более вытянуто в продольном направлении, расхождение площади составляет от 15 до 21 %.

В пятом разделе предложены способы применения результатов исследования на локомотивах использованием магнитных усилителей коэффициента сцепления колёс локомотива с рельсами (МУКС), выбраны места расположения индукторов, приведены режимы намагничивания, определён прирост силы тяги колёс тепловоза.

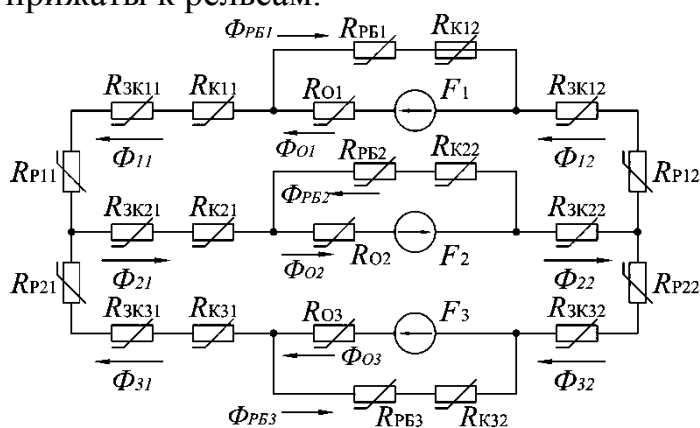
Для количественной оценки эффекта влияния магнитного поля применительно к трибосистеме локомотивных колёс и рельсам были проведены испытания с использованием маневрового тепловоза ЧМЭЗ. При помощи опытного образца индукторного устройства было осуществлено намагничивание зон контакта первой по направлению движения колёсной пары с рельсами. Устройство уложено на рельсы поперёк оси пути, образуя замкнутый ферромагнитный контур: сердечник с обмоткой, рельсы и колёсная пара. Незадействованные тяговые двигатели локомотива были отключены, а под колёса уложены тормозные башмаки для создания сопротивления движению тепловозу. Методика проведения испытаний заключалась в оценке сцепления колёсной пары тепловоза посредством величины тока тягового двигателя и номера позиции контроллера в момент возникновения буксования.

Серии испытаний проведены как для сухих очищенных поверхностей катания колёс и рельсов, так и при наличии на рабочих поверхностях рельсов воды с добавлением мазута. Испытания показали, что в условиях сниженного сцепления предварительное включение устройства позволяет предотвратить развитие буксования и обеспечивает переход на более высокую позицию контроллера, последующее выключение устройства сопровождается срывом сцепления. Намагничивание зон контакта колёс с рельсами способствует увеличению тока тягового двигателя в момент начала буксования $I_{тэд}^Б$ на величину от 9 до 11 %, следовательно, увеличивается наибольшая сила тяги колёсной пары.

На устройства, составной частью которых являются МУКС, были поданы заявки и получены патенты РФ. Устройства обобщают основные конструктивные особенности МУКС и локомотивного тягового привода. Наибольшие энергетические потери в механической части тягового привода приходятся на пятно контакта, применение МУКС сводится к исключению режимов работы тягового привода в условиях буксования. Таким образом, с точки зрения энергопотребления, возрастает энергоэффективность работы локомотива, также уменьшаются затраты, связанные с износом бандажа.

Рассмотрено осевое и хордовое расположение обмотки индуктора. Основные требования к конструкции МУКС следующие: не должно быть деталей магнитопровода, имеющих большой вес и материалоемкость, в качестве магнитопровода должны использоваться детали экипажной части, компоновка должна обеспечивать достаточное пространство для размещения обмотки, между магнитопроводом и колесом не должно быть значительного воздушного зазора. Указанным требованиям в наибольшей степени отвечает компоновка с обмоткой индуктора, размещенной на оси колёсной пары. Такое размещение является энергетически выгодным, это особенно актуально для автономных локомотивов, когда нет возможности потреблять дополнительную мощность извне.

Одна из причин низкой эффективности существующих магниторельсовых систем заключается в отрыве от рельса магнитного блока, отрыв сопровождается увеличением магнитного сопротивления, и ослаблением потока. В предложенном МУКС данный конструктивный недостаток отсутствует, поскольку колёса плотно прижаты к рельсам.



F – источник МДС; Φ – магнитный поток;
 R – магнитное сопротивление; ЗК – зона контакта колеса с рельсом, О – ось колёсной пары; К – колесо; Р – рельс; РБ – рама тележки и буксовый узел

Рисунок 11 – Схема замещения магнитной цепи трёхосной тележки тепловоза при расположении катушек на осях колёсных пар

При осевом расположении индукторов зоны контакта колёс с рельсами подсоединены к источникам МДС параллельно, схема замещения магнитной цепи трёхосной тележки тепловоза разветвлённая, рисунок 11. Контакты колёс с рельсами и источники МДС располагаются в замкнутых ферромагнитных контурах, зоны контакта крайних колёсных пар намагничиваются до индукции 1 Тл, а средней колёсной пары до 1,5 Тл. Для указанного режима МДС одного индуктора составляет 6000 А-витков, а его мощность – 31 кВт. Зоны контакта второй колёсной пары могут намагничиваться от трёх источников, а первой и третьей – от двух.

Для шестиосного тепловоза ЧМЭЗ принято три режима работы МУКС с осевым расположением индукторов, энергетические затраты на две тележки составляют от 186 до 500 кВт. Первый режим намагничивания – работают все шесть индукторов; второй режим намагничивания – работают по два индуктора на каждой тележке; третий режим намагничивания – работают по два индуктора на каждой тележке с кратковременным протеканием значительных токов.

При трогании и разгоне локомотива из-за ограничения по сцеплению возникает недоиспользование его тяговой мощности ΔP , эта величина зависит от скорости v и величины коэффициента сцепления ψ . При полном использовании локомотивом своих сцепных возможностей ΔP уменьшается с ростом скорости и коэффициента сцепления, рисунок 12.

Часть недоиспользованной тяговой мощности затрачивается на работу индукторов по намагничиванию наиболее склонных к буксованию колёсных пар N_M , что вызывает прирост сцепления и позволяет локомотиву развивать большую силу тяги на величину ΔF , рисунок 13.

$$\Delta P(v, \psi) = N_M + \Delta F \cdot v \quad (2)$$

При трогании тепловоза с места резерв мощности принимает наибольшее значение $\Delta P_{max}=700$ кВт. Это позволяет задействовать третий режим кратковременного намагничивания с протеканием по обмоткам индукторов токов, превышающих номинальный ток в 2-2,5 раза.

При трогании с места зоны контакта четырёх колёс намагничиваются до индукции 1,33 Тл, сцепление двух смежных колёсных пар тележки тепловоза повышается на 14 %. При разгоне потребляемая мощность увеличивается и достигает предельной величины по условиям ограничения мощности, происходит переход на менее энергоёмкий режим намагничивания. Выключение индукторов происходит после разгона до скорости, не допускающей возникновения буксования.

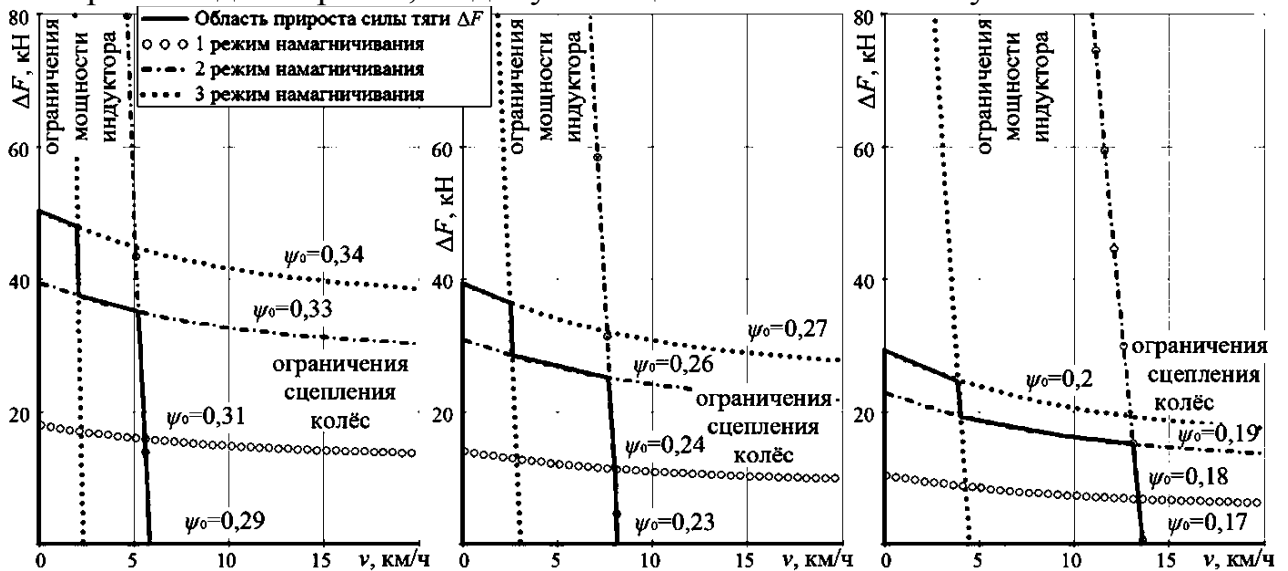


Рисунок 13 – Формирование областей прироста тяговых сил тепловоза ЧМЭЗ по условиям ограничения сцепления и мощности индуктора (значения коэффициента сцепления при трогании с выключенными индукторами: 0,29; 0,23; 0,17)

Ограничение по мощности и величина коэффициента сцепления при выключенных индукторах влияют на размеры области прироста силы тяги. В условиях сниженного сцепления интервал скоростей работы МУКС расширяется и выходит за пределы расчётной скорости тепловоза ЧМЭЗ, что подтверждает эксплуатационную эффективность использования МУКС, особенно на тех участках пути, где коэффициент сцепления систематически снижен.

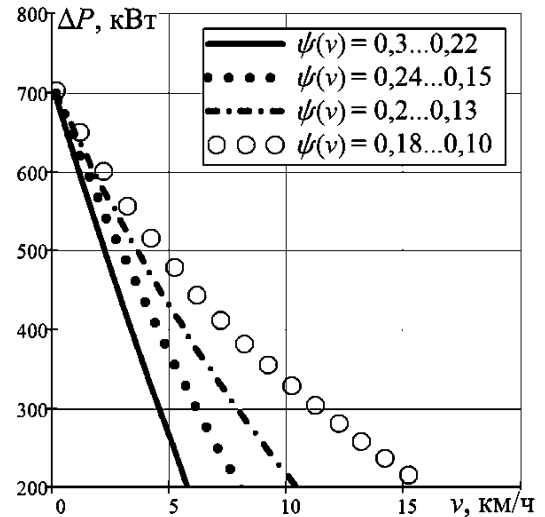


Рисунок 12 – Недоиспользованная тяговая мощность тепловоза ЧМЭЗ при реализации наибольшей силы тяги по условиям сцепления (все индукторы отключены)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с задачами диссертационного исследования получены следующие выводы и результаты.

1. Изготовленные трибометрические установки и инденторное устройство позволяют проводить эксперименты по установлению влияния магнитного поля на коэффициент трения. Пропускание магнитного потока через зону контакта стальных пар трения вызывает увеличение коэффициента трения главным образом за счёт молекулярной составляющей. Трение скольжения в режиме начального насыщения зоны контакта повышается на 13 %, при полном насыщении – на 22 %. Молекулярная составляющая коэффициента трения в режиме начального насыщения зоны контакта шара с плоскостью повышается от 15 до 19 %, при полном насыщении – от 20 до 25 %.

2. Существенное влияние на распределение магнитного поля между колесом и рельсом оказывает величина воздушного зазора. При наличии зазора между гребнем колеса и рельсом 98 % магнитного потока проходит через поверхность катания. При двухточечном гребневом контакте от 30 до 40 % магнитного потока переориентируется на поверхности гребня и выкружку, за счёт чего снижается эффективность намагничивания зоны контакта. Рекомендуется величину магнитного напряжения, приложенного к зоне контакта колеса с рельсом, поддерживать в пределах от 123 до 257 А, это позволит эффективно намагнитить приконтактную область и обеспечить коэффициент магнитного перекрытия больше единицы для 65 % случаев контактирования.

3. Площадь и ширину контакта колеса с рельсом можно определить аналитически, более точные размеры неэллиптического контакта определяются в результате моделирования. В дальнейшем информация о величине и форме контактного пятна колёс железнодорожного подвижного состава с рельсами передаётся в систему регулирования, где определяется эффективность намагничивания, и задаются токи индукторов.

4. Рекомендуется оснащение локомотивов МУКС выполнять с использованием осевого способа расположения обмотки. Для тележек тепловоза ЧМЭЗ намагничивание зон контакта наиболее склонных к буксованию колёсных пар целесообразно выполнять двумя индукторами. Энергетические затраты на намагничивание составляют от 186 до 500 кВт, прирост силы тяги локомотива достигает от 17 до 50 кН.

5. Результаты исследований показывают, что МУКС улучшают тяговые качества тепловозов на величину от 9 до 11 %. Перспектива полной реализации всех возможностей МУКС возможна при решении ряда задач, связанных с конструкцией тяговых приводов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Воробьев, В.И. Особенности синтеза механической части энергосберегающего тягового привода локомотива [Текст] / В.И. Воробьев, О.В. Измеров, М.И. Борзенков, В.С. Авдащенко, В.О. Корчагин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орёл : Госуниверситет-УНПК, 2015. – № 1 (309). – С. 73–80. – ISSN 2073-7408.
2. Тихомиров, В.П. Метод прогнозирования боксования путем анализа характеристик контакта колеса и рельса [Текст] / В.П. Тихомиров, А.Г. Стриженок, В.О. Корчагин, О.В. Измеров // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2016. – № 4 (52). – С. 57–65. – ISSN 1999-8775.
3. Космодамианский, А.С. Увеличение сцепления колес локомотива с рельсами воздействием постоянных магнитных полей на зону контакта [Текст] / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, В.О. Корчагин // *Наука и техника транспорта*. – 2017. – № 2. – С. 8–15. – ISSN 2074-9325.
4. Антипин, Д.Я. Контактное пятно при конформном взаимодействии колеса железнодорожного подвижного состава с рельсом [Текст] / Д.Я. Антипин, А.С. Космодамианский, В.О. Корчагин // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2017. – № 2 (55). – С. 140–145. – ISSN 1999-8775.

Патенты РФ и авторские свидетельства

5. Устройство для предотвращения буксования локомотива [Текст] : пат. 156444 Рос. Федерация : МПК В61С15/08 / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Пугачев А.А., Измеров О.В., Бондаренко Д.А., Корчагин В.О. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "БГТУ". – № 2015109505/11 ; заявл. 18.03.2015 ; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31.
6. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами [Текст] : пат. 163519 Рос. Федерация : МПК В61С15/08, В60L15/20 / Воробьев В.И., Новиков В.Г., Измеров О.В., Корчагин В.О., Авдащенко В.С., Моспанова Н.Ю. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "БГТУ". – № 2015125762/11 ; заявл. 29.06.2015 ; опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20.
7. Устройство для предотвращения буксования локомотива [Текст] : пат. 167614 Рос. Федерация : МПК В61С15/08 / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Пугачев А.А., Измеров О.В., Бондаренко Д.А., Корчагин В.О., Шорохов С.Г., Маслов М.А., Редя Н.А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "БГТУ". – № 2016117353 ; заявл. 04.05.2016 ; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.
8. Устройство для предотвращения буксования локомотива [Текст] : пат. 167616 Рос. Федерация : МПК В61С15/08 / Воробьев В.И., Новиков В.Г., Корчагин В.О., Новиков А.С., Измеров О.В., Воробьев Д.В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "БГТУ". – № 2016112630 ; заявл. 04.04.2016 ; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.
9. Устройство для предотвращения буксования локомотива [Текст] : пат. 171080 Рос. Федерация : МПК В61С15/08 / Антипин Д.Я., Воробьев В.И., Пугачев А.А., Измеров О.В., Копылов С.О., Корчагин В.О., Бондаренко Д.А., Шорохов С.Г.,

Мануева М.В., Ашуркова С.Н. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "БГТУ". – № 2016112634 ; заявл. 04.04.2016 ; опубл. 19.05.2017, Бюл. № 14.

10. Устройство для увеличения давления колёс транспортного средства на рельсы [Текст] : пат. 171138 Рос. Федерация : МПК В61С15/04, В61С15/08 / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Бондаренко Д.А., Измеров О.В., Корчагин В.О., Маслов М.А., Шорохов С.Г., Тысева Н.Ю. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "БГТУ". – № 2016124242 ; заявл. 17.06.2016 ; опубл. 22.05.2017, Бюл. № 15.

11. Устройство для предотвращения буксования локомотива [Текст] : пат. 172435 Рос. Федерация : МПК В61С15/08 / Антипин Д.Я., Воробьев В.И., Измеров О.В., Маслов М.А., Корчагин В.О., Бондаренко Д.А., Шорохов С.Г., Чечулин Е.С., Кобищанов В.В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "БГТУ". – № 2016117355 ; заявл. 04.05.2016 ; опубл. 07.07.2017, Бюл. № 19.

12. Устройство для предотвращения буксования локомотива [Текст] : пат. 172579 Рос. Федерация : МПК В61С15/08 / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Пугачев А.А., Измеров О.В., Бондаренко Д.А., Корчагин В.О., Космодамианский А.С., Шорохов С.Г., Редя Н.А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "БГТУ". – № 2016136742 ; заявл. 13.09.2016 ; опубл. 13.07.2017, Бюл. № 20.

13. Устройство для предотвращения буксования локомотива [Текст] : пат. 172641 Рос. Федерация : МПК В61С15/08, В60L15/20 / Антипин Д.Я., Воробьев В.И., Измеров О.В., Бондаренко Д.А., Корчагин В.О., Маслов М.А., Пугачев А.А., Редя Н.А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "БГТУ". – № 2016117354 ; заявл. 04.05.2016 ; опубл. 18.07.2017, Бюл. № 20.

14. Устройство для предотвращения буксования локомотива [Текст] : пат. 173552 Рос. Федерация : МПК В61С15/08 / Воробьев В.И., Новиков В.Г., Корчагин В.О., Новиков А.С., Измеров О.В., Воробьев Д.В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "БГТУ". – № 2016120627 ; заявл. 25.05.2016 ; опубл. 30.08.2017, Бюл. № 25.

15. Программа моделирования поперечного положения колёсной пары в колее [Текст] : свид. 2016617934 Рос. Федерация / Корчагин В.О. ; заявитель и правообладатель Корчагин В.О. – № 2016615131 ; заявл. 20.05.2016 ; опубл. 20.08.2016.

Монографии и учебные пособия

16. Антипин, Д.Я. Тяговые приводы локомотивов: поиск и выбор инновационных решений [Текст]+[Информационный ресурс]: учеб. пособие для студентов вузов ж.д. трансп. / Д.Я. Антипин, Д.А. Бондаренко, В.И. Воробьев, О.В. Измеров, В.О. Корчагин, А.С. Космодамианский, А.А. Пугачёв, С.Г. Шорохов. – Брянск : БГТУ, 2016. – 340 с. – ISBN 978-5-89838-881-2.

17. Воробьев, В.И. Синтез новых решений приводов транспортных систем в интеллектуальных САПР [Текст] : монография / В.И. Воробьев, О.В. Дорофеев, О.В. Измеров, М.И. Борзенков, А.С. Космодамианский, С.Н. Злобин, А.А. Пугачёв, С.О. Копылов, В.О. Корчагин; под ред. академика Академии электротехн. наук Рос. Федерации, д-ра техн. наук, проф. А.С. Космодамианского. – Орёл : ОГУ имени И.С. Тургенева, 2017. – 304 с. – ISBN 978-5-9929-0452-9.

18. Антипин, Д.Я. Проблемы снижения уровня фрикционных автоколебаний в тяговых приводах рельсового подвижного состава [Текст] + [Электронный ресурс] : монография / Д.Я. Антипин, В.И. Воробьев, О.В. Измеров, В.О. Корчагин, А.С. Космодамианский. – Брянск : БГТУ, 2017. – 188 с. – ISBN 978-5-89838-964-2.

Публикации в других изданиях

19. Корчагин, В.О. Аппроксимация симметричной петли гистерезиса магнитного материала [Текст] / В.О. Корчагин, Н.И. Климентов // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники. Инженерные идеи XXI века: труды Всерос. студенческой науч.-техн. конф. – Воронеж : ГОУВПО «ВГТУ», 2009. – С. 42-44.
20. Корчагин, В.О. Применение ряда Фурье для получения аналитического выражения симметричной петли гистерезиса магнитного материала [Текст] / В.О. Корчагин, Н.И. Климентов // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники. Инженерные идеи XXI века: труды Всерос. студ. науч.-техн. конф. – Воронеж : ГОУВПО «ВГТУ», 2010. – С. 62-65.
21. Корчагин, В.О. Получение аналитического выражения кривой тока катушки с сердечником при синусоидальном напряжении питания [Текст] / В.О. Корчагин, Н.И. Климентов // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники. Инженерные идеи XXI века: труды Всерос. студенческой науч.-техн. конф. – Воронеж : ГОУВПО «ВГТУ», 2011. – С. 26-29.
22. Корчагин, В.О. Получение пели гистерезиса магнитного материала по несинусоидальной кривой тока с использованием фигур Лиссажу [Текст] / В.О. Корчагин, Н.И. Климентов // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники. Инженерные идеи XXI века: труды Всерос. студ. науч.-техн. конф. – Воронеж : ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2013. – С. 31-33. – ISBN 978-5-7731-0340-0.
23. Пугачёв, А.А. Сравнительный анализ путей снижения потерь энергии в тяговом приводе локомотива [Текст] / А.А. Пугачёв, С.Г. Волохов, О.В. Измеров, В.О. Корчагин // Энерго- и ресурсосбережение XXI век.: материалы XII международной научно-практической интернет-конференции, 15 марта – 30 июня 2014 г., г. Орёл. – Орёл : Госуниверситет-УНПК, 2014. – С. 158-162. – ISBN 978-5-93932-761-9.
24. Волохов, С.Г. Безынерционное регулирование коэффициента трения как инновационная технология для новых конструкций локомотивов [Текст] / С.Г. Волохов, В.Н. Козловский, В.О. Корчагин, В.С. Авдащенко // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Рогалёва. – Брянск : БГТУ, 2015. – С. 225-227. – ISBN 978-5-89838-807-2.
25. Козловский, В.Н. Энергосберегающий тяговый привод локомотива [Текст] / В.Н. Козловский, В.О. Корчагин // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Рогалёва. – Брянск : БГТУ, 2015. – С. 248-250. – ISBN 978-5-89838-807-2.
26. Корчагин, В.О. Установка для исследования стальных пар трения при воздействии магнитного поля [Текст] / В.О. Корчагин, В.И. Воробьев // Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия. – № 7(14). – Новосибирск, 2015. – С. 36-39. – ISSN 34567-1769.
27. Космодамианский, А.С. Новые методы предотвращения боксования локомотивов и возможность их реализации [Текст] / А.С. Космодамианский, О.В. Измеров, С.О. Копылов, В.О. Корчагин // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы третьей всерос. науч.-техн. конф. с международным участием. – Омск : ОмГУПС, 2016. – С. 182-190. – ISBN 978-5-949-41155-1.
28. Измеров, О.В. Возможности повышения энергоэффективности тягового привода [Текст] / О.В. Измеров, В.О. Корчагин // Совершенствование транспортных машин: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Рогалёва. – Брянск : БГТУ, 2017. – С. 105-113. – ISBN 978-5-89838-970-3.

29. Воробьёв, В.И. Индентерное устройство для определения молекулярной составляющей коэффициента трения [Текст] / В.И. Воробьёв, В.П. Тихомиров, В.О. Корчагин, С.Г. Волохов // Совершенствование транспортных машин: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Рогалева. – Брянск : БГТУ, 2017. – С. 125-129. – ISBN 978-5-89838-970-3.

30. Воробьёв, В.И. Моделирование усилителя сцепления колеса с рельсом [Текст] / В.И. Воробьёв, В.О. Корчагин, С.Г. Волохов // Совершенствование транспортных машин: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Рогалёва. – Брянск : БГТУ, 2017. – С. 147-153. – ISBN 978-5-89838-970-3.

31. Корчагин, В.О. Исследование взаимодействия колеса и рельса [Текст] / В.О. Корчагин // Совершенствование транспортных машин: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Рогалёва. – Брянск : БГТУ, 2017. – С. 184-190. – ISBN 978-5-89838-970-3.

32. Kosmodamianskiy, A.S. Contact spot for conformal interface of the railroad locomotive wheel with the rail / A.S. Kosmodamianskiy, V.O. Korchagin, V.I. Vorobiev // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference on Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 2017. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076434.

33. Корчагин, В.О. Моделирование поперечного положения колесной пары в рельсовой колее [Текст] / В.О. Корчагин, М.А. Маслов // Повышение эффективности транспортных машин : сб. науч. тр. / под ред. В.И. Воробьева, В.В. Рогалева. – Брянск : БГТУ, 2017. – С. 79-86. – ISBN 978-5-906967-31-2.

34. Корчагин, В.О. Стабилизация тяговых качеств локомотивов посредством магнитных усилителей сцепления колес с рельсами [Текст] / В.О. Корчагин, М.А. Маслов // Повышение эффективности транспортных машин : сб. науч. тр. / под ред. В.И. Воробьева, В.В. Рогалева. – Брянск : БГТУ, 2017. – С. 149-154. – ISBN 978-5-906967-31-2.

35. Корчагин, В.О. Особенности распределения магнитного поля в зоне контакта колеса с рельсом [Текст] / В.О. Корчагин // Повышение эффективности транспортных машин : сб. науч. тр. / под ред. В.И. Воробьева, В.В. Рогалева. – Брянск : БГТУ, 2017. – С. 155-160. – ISBN 978-5-906967-31-2.

КОРЧАГИН Вадим Олегович

**УЛУЧШЕНИЕ ТЯГОВЫХ КАЧЕСТВ ТЕПЛОВОЗОВ
ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА
КОНТАКТ ТРИБОСИСТЕМЫ КОЛЕСО – РЕЛЬС**

Автореферат диссертации на соискание
учёной степени кандидата технических наук

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Подписано в печать
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 80 экз. Заказ

Формат 60x84/16

Отпечатано в типографии ООО ИПЦ «Научная книга»
394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 116
Тел. +7 (473) 200-57-15
<http://www.n-kniga.ru>. E-mail: typ@n-kniga.ru