

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта (МИИТ)»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

КОРЧАГИН Вадим Олегович

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

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

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

МОСКВА – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И СТЕПЕНИ РАЗРАБОТАННОСТИ ПРОБЛЕМЫ.....	11
1.1 Модели контактирования колеса с рельсом.....	11
1.2 Влияние магнитного поля на физико-механические свойства металлов.....	20
1.3 Способы повышения сцепления колёс локомотива с рельсами	28
1.4 Выводы по разделу 1	32
2 ТРИБОМЕТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ПАР ТРЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	33
2.1 Установка для исследования трения качения со скольжением.....	33
2.2 Определение характеристик магнитного поля.....	39
2.3 Исследование молекулярной составляющей коэффициента трения.....	48
2.4 Выводы по разделу 2	55
3 НАМАГНИЧИВАНИЕ ЗОНЫ КОНТАКТА КОЛЕСА С РЕЛЬСОМ	56
3.1 Особенности моделирования магнитного поля между колесом и рельсом	56
3.2 Формирование области насыщения в зоне контакта колеса с рельсом	59
3.3 Выводы по разделу 3	70
4 ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОФИЛЕЙ КОЛЕСА И РЕЛЬСА.....	71
4.1 Моделирование геометрии контактного пятна в программном комплексе UM Loco	71
4.2 Программа моделирования поперечного положения колёсной пары в колее	78
4.3 Аппроксимация профиля, условия конформности контакта	84
4.4 Выводы по разделу 4	95

5 МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ КОЭФФИЦИЕНТА СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЁС С РЕЛЬСАМИ. ПРЕДЛОЖЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	96
5.1 Магнитные усилители коэффициента сцепления колёс локомотива с рельсами	96
5.2 Магнитная цепь трёхосной тележки тепловоза, оборудованной устройством увеличения сцепления	107
5.3 Режимы работы индукторов на шестиосном маневровом тепловозе.....	110
5.4 Выводы по разделу 5	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	116
Приложение А Результаты моделирования поперечного положения колёсной пары в колее.....	135
Приложение Б Акты результатов исследований.....	159
Приложение В Разложение профиля колеса в тригонометрический ряд Фурье	161
Приложение Г Патенты РФ и авторские свидетельства	165

ВВЕДЕНИЕ

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 колёс с рельсами действует в широком диапазоне скоростей.

Общепризнанным фактом среди российских и зарубежных специалистов в области тяги поездов является то, что тяговые возможности локомотива главным образом формируются величиной осевых нагрузок и коэффициентом сцепления [1-12]. 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 [2]. В условиях повышения весовых норм грузовых 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 [2, 3, 8, 12]. 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.

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

Предметом исследования является зона контакта колеса и рельса.

Целью диссертационной работы является разработка и совершенствование научно обоснованных методов и способов улучшения тяговых качеств тепловозов воздействием постоянного магнитного поля на контакт колёс с рельсами.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные **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. Выполненные в рамках настоящей диссертации исследования, дали результаты, которые можно отнести к научной новизне.

– 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.

Реализация результатов работы. Результаты работы включены в учебное пособие [13], также внедрены и используются в учебном процессе на кафедре «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

– 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.

На защиту вынесены следующие основные положения диссертации:

- 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 28 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.

В первом разделе выполнен анализ работ, посвящённых влиянию магнитного поля на физико-механические свойства металлов, рассмотрены модели контактирования и способы повышения сцепления колёс железнодорожного подвижного состава с рельсами.

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.

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 четвёртом разделе проведено компьютерное моделирование взаимодействия колёс с рельсами, для выявления влияния износа и поперечного положения колёсной пары в колее на размеры контактного пятна. Выполнено аналитическое исследование взаимодействия профиля колеса с профилем рельса.

В пятом разделе предложены способы применения результатов исследования на локомотивах путём использования магнитных усилителей коэффициента сцепления колёс с рельсами, выбраны места расположения индукторов, приведены режимы намагничивания, изложены результаты опытных испытаний индукторного устройства увеличения сцепления колёс с рельсами, определён прирост силы тяги колёс тепловоза.

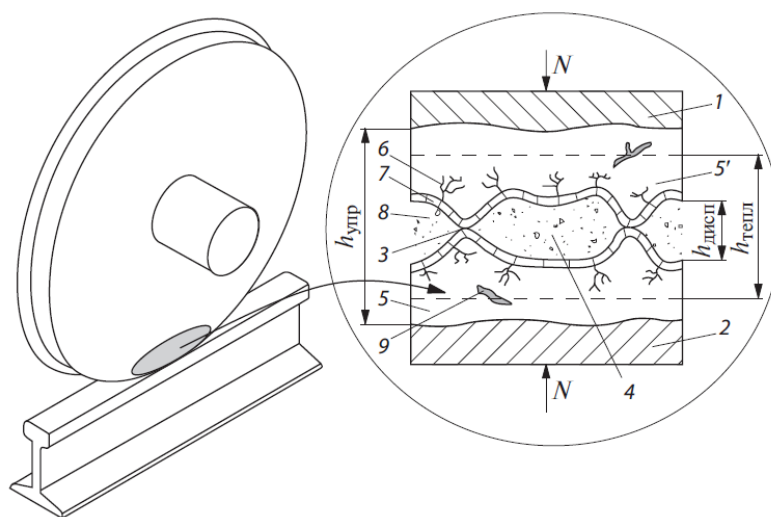
Автор выражает признательность за плодотворное обсуждение и ценные замечания профессорско-преподавательскому составу кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта (МИИТ), кафедры «Подвижной состав железных дорог» и специалистам лаборатории «Вычислительной механики» Брянского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

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И СТЕПЕНИ РАЗРАБОТАННОСТИ ПРОБЛЕМЫ

1.1 Модели контактирования колеса с рельсом

Качение колеса по рельсу является основополагающим процессом в работе железной дороги, можно с уверенностью сказать, что большинство подразделений работает на колесо. При качении колёсных пар выполняется главная функция транспорта. 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 [2-12, 14-29]. Современное представление о взаимодействии колеса с рельсом базируется на достижениях в различных областях науки: механике, физике, химии, трибологии, триботехнике, материаловедении и др. 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 трения, контактного взаимодействия, в том числе относящиеся к сцеплению колеса с рельсом [2-11, 14-18, 20-22, 29-33].

В работе [6] представлена модель поверхностей колёс и рельсов, на которых в процессе обработки и эксплуатации образуются выступы и впадины различной величины, при соприкосновении выступы формируют истинный контакт. Прижатие колеса к рельсу силой N приводит к наклепу и упрочнению поверхностных слоёв толщиной $h_{\text{упр}}$. Между поверхностями располагается дисперсный слой загрязнений $h_{\text{дисп}}$ из продуктов износа и адсорбированных молекул газов и жидкостей, толщина которых лежит в пределах от 7 до 35 мкм. Модель фрикционного контакта колеса с рельсом приведена на рисунке 1.1.



1 – колесо; 2 – рельс; 3 – контакт выступов; 4 – дисперсный слой; 5 – наклепанные (упрочненные) слои; 5' – деформированный материал, подвергшийся тепловому воздействию при трении колеса и рельса; 6 – внутренние межкристаллические трещины (в результате действия механических и тепловых напряжений, адсорбции, расклинивающего действия и коррозии); 7 – окисные и адсорбированные слои колеса и рельса; 8 – окружающая газовая, капельная и пылевидная (твёрдые частицы) среда; 9 – подповерхностная трещина (флокен, насыщенный водородом в процессе фрикционного взаимодействия твёрдых тел)

Рисунок 1.1 – Модель фрикционного контакта колеса с рельсом [6]

В данной модели авторы рассматривают возможность управления свойствами контакта колеса с рельсом путём изменения температуры в плоскости контакта по сравнению с температурой подповерхностных слоёв, рисунок 1.2. Трение возникает как на поверхности материала, так и внутри в результате сдвига слоёв. Тепловая деформация при трении распространяется на глубину $h_{\text{тепл}}$. Режим скольжения колеса относительно рельса сопровождается повышенным тепловыделением, материал прогревается на глубину до 1,5 см, величина температуры составляет от 400 до 600 °C. Контактные и термические напряжения приводят к изменению структуры в очаге деформации, поверхностный слой претерпевает пластическую деформацию. Повышение пластичности контакта, вызванное уменьшением твёрдости, увеличивает фактическую площадь, приближая её к контурной и номинальной [6].

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 [19].

Упругие свойства стали, будучи структурно нечувствительными, связаны с природой возникновения сил трения [19, с. 310]. Процесс трения складывается из макроскопических и микроскопических взаимодействий. Микро- и макрогеометрия колеса и рельса влияет на величину пятна контакта [18, 37], на трение и износ [38], особенно на этапе приработки поверхностей. К макрогеометрическим факторам относят диаметр колеса, конусность профиля, наличие проката на поверхности катания, к микрогеометрическим факторам относят шероховатость, волнистость рабочих поверхностей.

При взаимодействии тел образуется номинальная, контурная и фактическая площадь контакта [16, с. 58]. Номинальная (геометрическая) площадь очерчена макрогеометрией тел. Для тел различной кривизны номинальная площадь формируется путём упругой деформации [39, с. 164]. Фактическая (истинная, физическая) площадь формируется за счёт деформаций микронеровностей (преимущественно пластических). Микропластические деформации возникают на участках материала, где напряжения превышают предел текучести. На величину фактической площади контакта влияют нагрузка и шероховатость поверхностей [15, с. 217].

Отклонения поверхности тела от макроформы подразделяются на макроотклонения, волнистость и шероховатость. Волнистость поверхности по своим размерам меньше макроотклонений и превышает шероховатость [23, с. 10]. Под волнистостью понимается повторяющиеся и близкие по размерам неровности поверхности в форме выступов и впадин. Для волнистой поверхности характерное отношение шага неровностей к их высоте равно 40 [22, 23, 39].

Смятие волнистости тел обуславливает контурную площадь. Работы [12, 39] показывают, что волнистостью можно пренебречь при контакте криволинейных тел несогласованной формы, когда номинальная площадь невелика. Это позволяет пользоваться формулами теории упругости для абсолютно гладких тел при

аналитическом определении контурной площади. Опытным путём контурная площадь фиксируется по отпечаткам на бумаге, фольге или краске помещаемых в зону контакта [22, с. 46]. Понятие контурной площади было введено И.В. Крагельским и Н.Б. Демкиным, это позволило перейти от номинальной площади контакта к фактической и получить зависимости, пригодные для выполнения инженерных расчётов [16, 18, 39].

Поскольку у контактирующих поверхностей колеса и рельса волнистость незначительна: шаг волны в 200-500 раз превышает её высоту, то деформироваться волнистость будет преимущественно упруго. Для контактирующих поверхностей колеса и рельса расстояние между волнами соизмеримо с номинальным контактом: на номинальную поверхность приходится одна или две волны, в этих условиях и размеры контурной площади примерно соответствуют номинальной площади [12, с. 93].

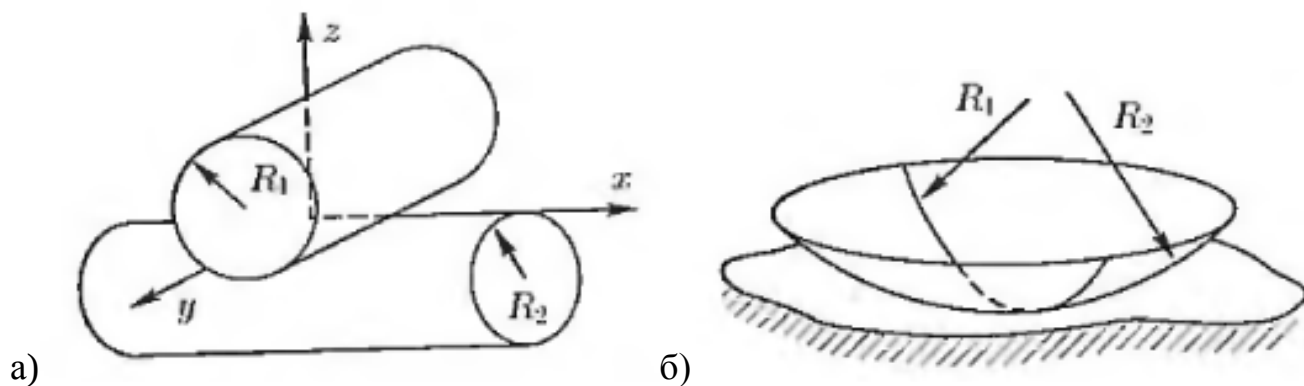
Модель контакта упругих тел с искривлённой поверхностью.

Колесо и рельс могут быть представлены двумя упругими цилиндрами с радиусами R_1 и R_2 , оси цилиндров скрещены под углом 90° , рисунок 1.3 а. Расстояние между телами при точечном контакте без нагрузки задано зависимостью

$$h(x,y) = \frac{x^2}{2R_1} + \frac{y^2}{2R_2}.$$

Указанный контакт эквивалентен контакту упругого полупространства и абсолютно твёрдого тела с главными радиусами R_1 и R_2 [40, сс. 69-76],

рисунок 1.3 б.



а – скрещенные цилиндры;

б – полупространство и твёрдое тело

Рисунок 1.3 – Контакт упругих тел с искривлённой поверхностью [40]

Размеры эллиптической области контакта и распределение давления $p(x, y)$, согласно теории упругого взаимодействия Герца, определяются следующими выражениями.

$$S = \pi ab = \pi \bar{R}d, \quad p(x, y) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}, \quad (1.1)$$

где S – площадь контакта; a, b – полуоси эллиптической области контактного пятна $a = \sqrt{R_1 d}$, $b = \sqrt{R_2 d}$; $\bar{R}$ – гауссовский радиус кривизны $\bar{R} = \sqrt{R_1 R_2}$; d – глубина проникновения; p_0 – максимальное напряжение.

Максимальное внутреннее давление в контакте колеса локомотива с рельсом определим с учётом того, что радиус колеса и радиус поверхности катания рельса близки ($R_1 \approx R_2$, 525 ≈ 500 мм). Таким образом, взаимодействие идентично контакту упругого шара радиусом R и упругого полупространства [40, с. 75].

$$p_0 = \sqrt[3]{\frac{6FE^{*2}}{\pi^3 R^2}}, \quad a = \sqrt[3]{\frac{3FR}{4E^*}}, \quad (1.2)$$

где F – нагрузка на колесо $F \approx 10^5$ Н; E^* – эффективный модуль упругости рельсовой стали $E^* \approx \frac{E}{2(1-\nu^2)} \approx \frac{2 \cdot 10^{11}}{2(1-0,33^2)} \approx 1,2 \cdot 10^{11}$ Па; ν – коэффициент Пуассона рельсовой стали $\nu = 0,33$; a – радиус контактного круга.

$$p_0 = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 10^5 \cdot (1,2 \cdot 10^{11})^2}{\pi^3 \cdot 0,525^2}} \approx 1,0 \text{ ГПа}, \quad a = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 10^5 \cdot 0,525}{4 \cdot 1,2 \cdot 10^{11}}} \approx 6,9 \text{ мм}.$$

Для колеса диаметром $D_k = 1050$ мм упругое проникновение составляет

$$d = \frac{\pi a p_0}{2E^*} = \frac{a^2}{R} = \left(\frac{3F}{4E^* \sqrt{R}} \right)^{2/3} \approx 91 \text{ мкм}, \text{ а площадь пятна контакта равняется}$$

$$S = \pi \cdot 0,525 \cdot 91 \cdot 10^{-6} \approx 150 \text{ мм}^2.$$

При диаметре колеса 1250 мм упругое проникновение составляет 86 мкм, площадь контакта равняется 168 мм². Величина проникновения от диаметра колеса имеет нисходящую зависимость, а размеры площади контакта – восходящую, рисунок 1.4.

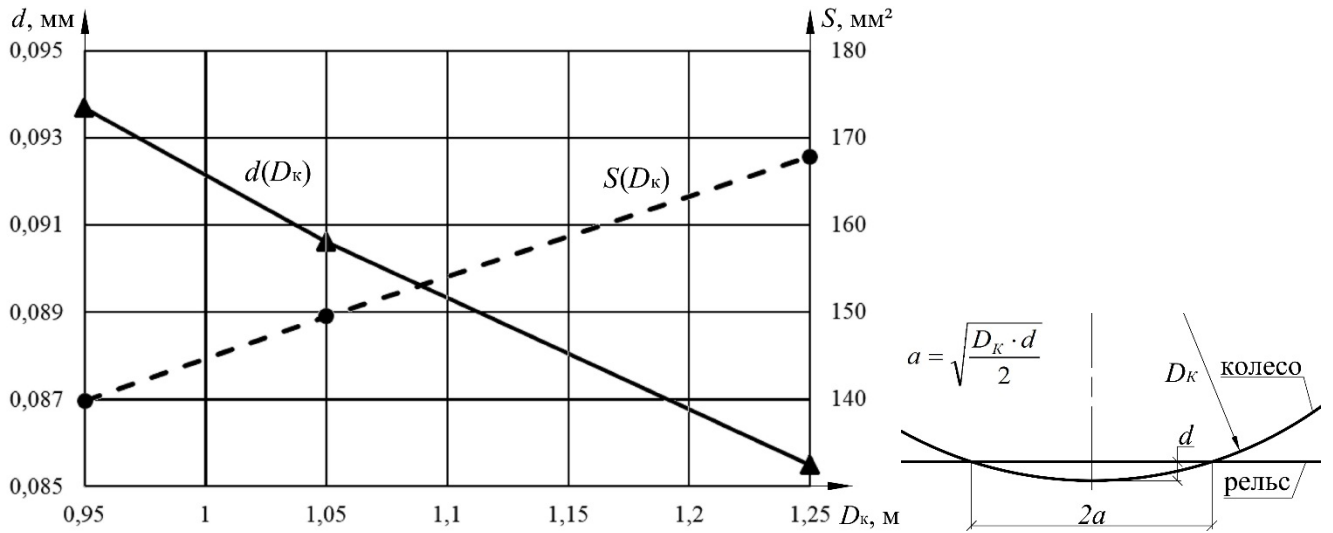


Рисунок 1.4 – Проникновение и размеры контакта от диаметра колеса

В общем случае, если между колесом и рельсом не приложена сжимающая нагрузка и криволинейные поверхности до деформации соприкасаются в одной точке (точке контакта), то площадка контакта имеет форму эллипса. Точечный контакт недеформированных твёрдых тел, ограниченных криволинейными поверхностями, характеризуется четырьмя главными радиусами кривизны и углом ω между плоскостями главных кривизн соприкасающихся тел. На поверхности изношенного колеса помимо продольной кривизны k_{11} в точке контакта существует поперечная кривизна величиной k_{12} . Кривизны рельса k_{21} и k_{22} берутся во взаимно перпендикулярных плоскостях, пересекающихся по линии действия сжимающей нагрузки, проходящей через точку контакта. Площадь эллиптического контакта S и сближение поверхностей колеса и рельса d под действием сжимающей нагрузки F определяются по формулам [41, сс. 54-56].

$$S = \pi n_a n_b \left(\frac{3F}{2E^* \sum k} \right)^{2/3}, \quad d = \frac{n_a}{2} \sqrt[3]{\frac{9 \sum k F^2}{4(E^*)^2}}, \quad (1.3)$$

где $\sum k$ – сумма главных кривизн сопрягаемых тел $\sum k = k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22}$; n_a ; n_b – коэффициенты полуосей эллипса, зависят от вспомогательного аргумента Ω .

$$\Omega = \frac{1}{\sum k} \sqrt{(k_{11} - k_{12})^2 + (k_{21} - k_{22})^2 + 2(k_{11} - k_{12})(k_{21} - k_{22}) \cos \omega}. \quad (1.4)$$

Модель Дж.А. Гринвуда и Дж.Б.П. Вильямсона

В работе [36] J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson рассматривали задачу контактного взаимодействия идеально гладкой и шероховатой поверхностей. Теория основывается на предположении, что поверхности имеют стохастическую шероховатость, все пики неровностей имеют форму сферы радиусом R [40, сс. 91-96], рисунок 1.5.

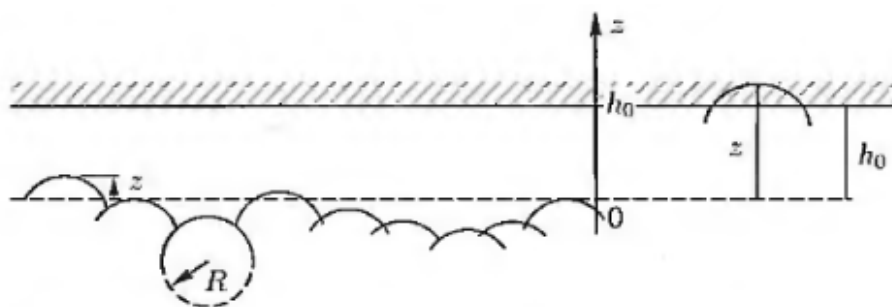


Рисунок 1.5 – Модель Гринвуда и Вильямсона шероховатой поверхности [40]

Постулируем, что на поверхности присутствует N_0 неровностей, их высота соответствует нормальному закону распределения $\Phi(z)$ относительно среднего значения со среднеквадратичным разбросом высот l .

$$\Phi(z) = \sqrt{\frac{1}{2\pi l^2}} e^{-\frac{z^2}{2l^2}}, \quad l = \sqrt{\langle z^2 \rangle}. \quad (1.5)$$

При зазоре между гладкой и шероховатой поверхностями h_0 наличие контакта для отдельной неровности с высотой пика z соответствует условию $z > h_0$. Величина упругого вдавливания неровности в гладкую поверхность определяется как разность высоты пика и расстояния между поверхностями $d = z - h_0$. Количество контактов N между поверхностями, а также суммарную (фактическую) площадь S и нормальную силу взаимодействия F_N определяют интегрированием закона распределения шероховатости, единичного контакта $\Delta S = \pi R(z - h_0)$ и нагрузки на нём $\Delta F = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R}(z - h_0)^{1.5}$ по высотам всех неровностей.

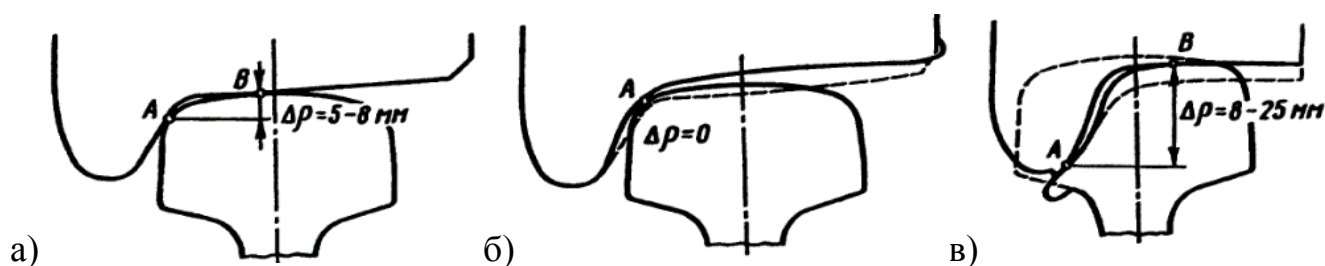
$$N = N_0 \int_{h_0}^{\infty} \Phi(z) dz, \quad S = \pi R N_0 \int_{h_0}^{\infty} \Phi(z) (z - h_0) dz, \quad (1.6)$$

$$F_N = \frac{4}{3} N_0 E^* \sqrt{R} \int_{h_0}^{\infty} \Phi(z) (z - h_0)^{1.5} dz. \quad (1.7)$$

По мере сближения поверхностей ($h_0 \rightarrow 0$) наблюдается экспоненциальное возрастание числа пятен касания и суммарной площади [40].

Правила технической эксплуатации железных дорог устанавливает ширину колеи, расстояние между внутренними гранями колёс, величину проката и толщину гребня [42]. Соотношение этих параметров и величины допусков обеспечивает наличие суммарного зазора между рабочими гранями головок рельса и гребнями колес. Зазор обеспечивает вписывание колёсной пары в колею, его значение в зависимости от величины нормативного износа колёс и рельсов на прямом участке пути меняется от 7 мм до 43 мм.

На рисунке 1.6 представлены три группы контактирования гребня колеса и рельса. Первая группа – новое колесо с новым рельсом, доля таких контактов составляет от 5 до 10 %. Вторая группа – изношенное колесо с новым рельсом, доля этих контактов находится в пределах от 20 до 30 %. Эта группа соответствует одноточечному контакту гребня с рельсом, его образованию также способствует разуклонка рельсов. Третья группа – изношенное колесо с изношенным рельсом, их доля наибольшая – от 60 до 75 % [43, с. 142].



а – новое колесо с новым рельсом, б – изношенное колесо с новым рельсом

в – изношенное колесо с изношенным рельсом.

Рисунок 1.6 – Контактное взаимодействие гребня колеса с рельсом [43].

Разница расстояний от оси вращения колеса до точек контакта на гребне и поверхности катания $\Delta\rho$ характеризует степень проскальзывания гребня и протяжённость зоны соприкосновения колеса с рельсом. Отрыв поверхности катания колеса от рельса свидетельствует о процессе всползания [43].

1.2 Влияние магнитного поля на физико-механические свойства металлов

Большинство исследований последних десятилетий направлены на решение задач улучшения механических и эксплуатационных свойств материалов посредством привнесённых извне энергетических воздействий. Наряду с пластической деформацией материала, температурной обработкой, обработкой электрическим током, широкое развитие получило электромагнитное и магнитное воздействие [44-48].

К главным преимуществам магнитной обработки можно отнести: возможность дистанционного бесконтактного намагничивания, простота и универсальность оборудования, высокая скорость протекания процесса [49]. Ранние исследования по изменению свойств металлов намагничиванием относятся к 30-м годам XX века [50]. Гипотеза о влиянии магнитного поля получила развитие в последующие годы применительно к инструментальной стали [25-28, 51-56].

Магнитное поле способно воздействовать на углубленном (электронном, ядерном) уровне, в работах [25, 26, 54-56] повышение стойкости магнитообработанного инструмента объясняется изменением структуры дислокаций. Атомы, находящиеся в узлах кристаллической решётки, под воздействием внешней энергии оставляют вакансию и занимают межузловое положение.

Известно [26, сс. 237-240], что магнитное поле оказывает влияние на структурные фазовые превращения стали и механические свойства при термической обработке. Закалка металла с низким отпуском или без отпуска в магнитном поле повышает предел прочности. Высокий и средний отпуск с термомагнитной обработкой эквивалентен термической обработке. Влияние магнитного поля в процессе отпуска быстрорежущей стали способствует переходу остаточного аустенита в мартенсит с преобразованием тетрагонального мартенсита в кубический. Причём обработка резцов и свёрл переменным магнитным полем напряжённостью до $3,2 \cdot 10^5$ А/м, эквивалентна обработке постоянным магнитным полем напряжённостью до $5,6 \cdot 10^5$ А/м.

Микротвёрдость материала связана с пределом прочности и сопротивлением деформации. Структурные изменения стали подтверждаются и тем фактом, что стойкость размагниченных свёрл в переменном поле может быть такой же, как у намагниченных [57]. Магнитострикционные и магнитодисперсионные процессы упрочнения и твердения обуславливают улучшенные в 1,5-2 раза стойкостные зависимости у сверла из быстрорежущей стали после магнитной обработки [26, сс. 244-252], рисунок 1.7 а.

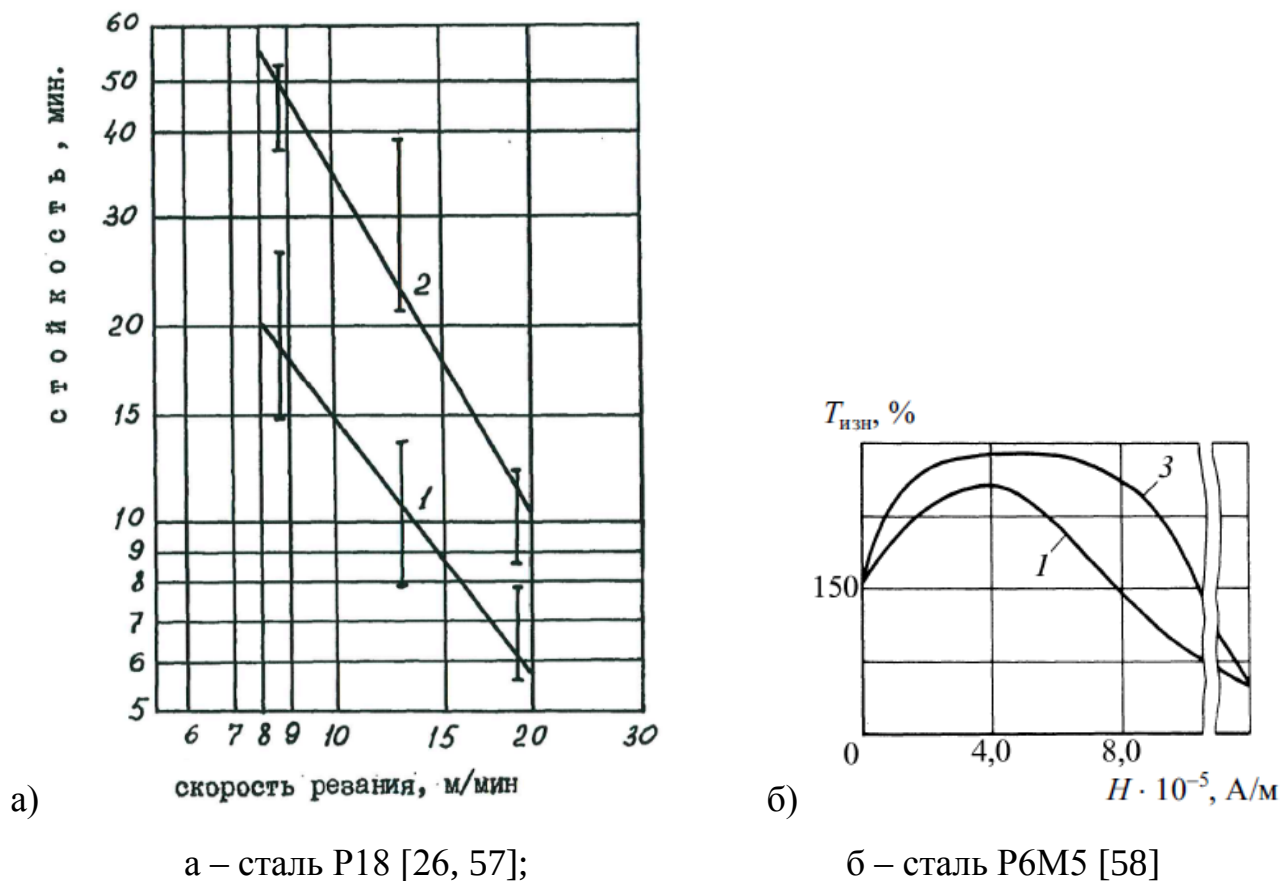


Рисунок 1.7 – Износостойкость стали до (1) и после (2, 3) магнитной обработки

В работе [58] Б.В. Малыгин отмечает благоприятное воздействие магнитных полей на физико-механические свойства: микротвёрдость, коррозионную стойкость, пластичность инструментальной стали. Перемещение дислокаций при воздействии магнитного поля объясняется снижением остаточных напряжений. Высказывается мнение, что каждой марке стали соответствует величина напряжённости импульсного магнитного поля, которая наилучшим образом способствует повышению технологических свойств и эксплуатационных характеристик стали:

упрочнению, снижению внутренних напряжений, изменению электромагнитных и тепловых свойств. Зависимость относительной износостойкости $T_{\text{изн}}$ стали Р6М5 от напряженности магнитного поля при магнитно-импульсной обработке с импульсом длительностью 0,6 с имеет немонотонный характер, максимальная износостойкость наблюдается при напряжённости величиной 400 А/м, рисунок 1.7 б.

Авторы работ [27, 28] отмечают, что намагничивание приводит к изменению температуры в контакте резца с материалом. Необратимое влияние магнитного поля на температуру ферромагнетика объясняется магнитотепловыми эффектами.

Магнитокалорический эффект вызван превращением работы поля в тепло. Для постоянных магнитных полей наибольший прирост температуры составляет около одного градуса. Термогальваномагнитные эффекты обусловлены влиянием магнитного поля на тепло- и электропроводность, включают эффекты: Эттингсгаузена, Нернста-Эттингсгаузена, Риги-Ледюка, объясняемые искривлением траектории носителей заряда под воздействием силы Лоренца и поля Холла [26, 59, 60]. Эффект Альберта фон Эттингсгаузена характеризуется образованием температурного градиента в проводнике с током, находящемся в магнитном поле. Продольный эффект Нернста-Эттингсгаузена заключается в изменении термоэдс металлов и полупроводников при воздействии магнитного поля на продольные и поперечные составляющие скорости электронов. Термомагнитный эффект Риги-Ледюка состоит в том, что при помещении проводника с градиентом температур в постоянное магнитное поле, возникает движение носителей зарядов, влияющее на ориентацию теплового потока. Отметим, что термомагнитные эффекты для поверхностей тел проявляются сравнительно слабо [26, с. 240].

Влиянию магнитных полей на прочность и пластичность металлов посвящены работы научно-исследовательских коллективов под руководством ряда учёных: В.И. Альшица, М.И. Каганова, В.Е. Громова, Л.Б. Зуева, В.И. Данилова и др. В 1987 г. под руководством профессора В.И. Альшица было выявлено движение дислокаций в кристаллах NaCl во время выдержки образцов в постоянном магнитном поле с индукцией величиной 0,5 Тл. Явление получило название магнитопластического эффекта (МПЭ) [61, 62].

Влияние МПЭ заключается в зарождении дислокаций и изменении пластических свойств материала при воздействии магнитного поля. В последующие годы было установлено влияние МПЭ на прочностные характеристики материала: снижение микротвёрдости, уменьшение предела текучести [63].

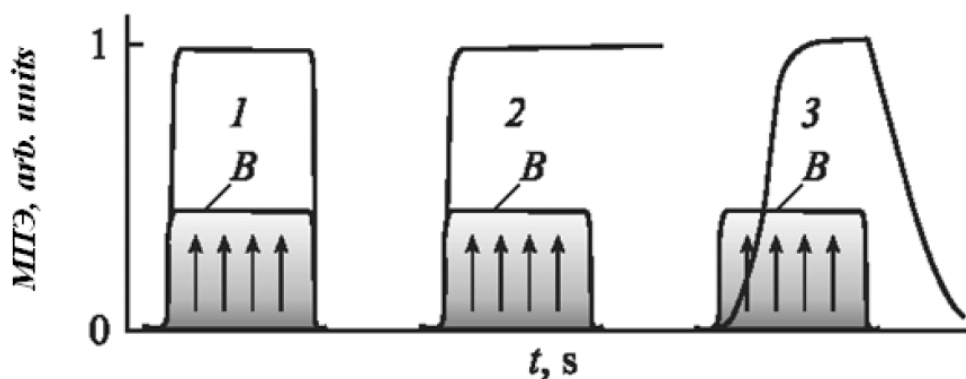
Макроскопические проявления МПЭ обнаружены у многих материалов в условиях активного нагружения, активной деформации, ползучести и внутреннего трения кристаллов. Исследования позволили выдвинуть и экспериментально подтвердить спиновую гипотезу МПЭ. К настоящему времени накоплено значительное количество экспериментальных данных, на основе которых строятся теоретические модели, конкретизируются весьма тонкие спиновые процессы. Трудности описания магнитопластичности связано со сложностью методов наблюдения из-за разницы в масштабах макроэффектов и спиновых процессов. Измерения, основанные на травлении поверхности кристалла, показывают косвенную картину процесса перемещения дислокаций в магнитном поле [62].

В настоящее время известно множество работ отечественных и зарубежных авторов, посвящённых магнитной пластичности, среди них и современные научные исследования слабых энергетических воздействий [61-83]. Пластические эффекты обусловлены образованием дислокаций, изменением количества вакансий и состояния поверхности [69, 72]. Экспериментально выявлена немонотонная зависимость ползучести алюминия от магнитной индукции величиной до 0,5 Тл [73]. В другой работе [74] установлено, что ползучесть алюминия чувствительна к постоянному магнитному полю с индукцией в интервале от 0,07 до 0,3 Тл, а при отсутствии магнитного воздействия его микротвёрдость достигает исходного значения согласно экспоненциальному закону. В алюминии МПЭ объясняется снижением энергетического барьера, из-за чего происходит активизация перемещения дислокаций. Влияние магнитного поля на пластичность металлов отмечено в работе [66].

Более ранние исследования [75-77] также подтверждают воздействие слабых магнитных полей на свойства кристаллических тел. Прирост пластического течения металлов объясняется возникновением силы Лоренса при движении в магнитном поле заряженных дислокаций.

Данные работ [78, 79] свидетельствуют о том, что после магнитной обработки конструкционных материалов улучшаются их механические и эксплуатационные свойства: повышается долговечность, прочность, износостойкость, снижаются усталостные и остаточные напряжения. В тоже время, нет единого качественного представления о характере воздействия магнитных полей на свойства металлов.

На сегодняшний день по длительности существования можно выделить три основные группы МПЭ: проявляющиеся одновременно с воздействием магнитного поля, необратимые и медленно обратимые эффекты после воздействия магнитного поля [80], рисунок 1.8.



1 – in situ эффекты, возникающие под действием магнитного поля;

2 – необратимые постэффекты; 3 – последствие с медленной релаксацией

Рисунок 1.8 – Типы поведения немагнитных материалов в магнитном поле [80]

В обзорах [80-82] отображены теоретические и экспериментальные исследования по влиянию МПЭ на физико-механические свойства тел. Отметим, что теоритическое объяснение природы МПЭ не является исчерпывающим, встречаются случаи рассогласования результатов [83, с. 467]. При намагничивании висмута микротвёрдость увеличивается, на алюминий магнитное поле оказывает противоположное воздействие.

Приведённые данные свидетельствуют о многогранности и сложности действия магнитного поля на свойства металлов, в разные годы были открыты взаимообуславливающие магнитные явления и эффекты. Наиболее часто встречаются: магнитотепловые, магнитострикционные, магнитодисперсионные и МПЭ.

Наиболее полное современное описание МПЭ дано в работе [62], авторы причисляют эффект к относительно новой и молодой группе явлений. Эффект заключается в инициировании слабым низкоэнергетическим магнитным полем процесса взаимодействия парамагнитных частиц, а также влиянии поля на спиновое состояние системы и химические реакции. Роль магнитного поля заключается в изменении структуры стопоров и уменьшении силы закрепления дислокаций.

Анализ публикаций [21, 84-92] позволяет встретить как ранние, так и современные исследования, посвященные трению твёрдых тел при наличии в зоне контакта электрического тока и магнитного поля. Ряд исследований напрямую относятся к сцеплению колеса с рельсом, есть и такие, которые описывают схожие физические процессы.

Работы Д.В. Воробьёва [84-87] посвящены исследованию вопросов влияния на сцепление колеса с рельсом различных факторов: контактных напряжений, состояния поверхности, наличия в зоне контакта электрического тока и магнитного поля. Выявлено, что пропускание тока через зону контакта приводит к более чем двукратному возрастанию коэффициента трения с 0,165 до 0,371 при влажном контакте и до 0,452 при сухом контакте. Зафиксировано повышение сцепления за счёт воздействия магнитного поля с 0,165 до 0,222. Данные явления объясняются ростом температурного градиента в контакте металлов и увеличением фактической площади контакта. Было показано, что физические поля оказывают влияние на триботехнические свойства узла трения. Стендовые испытания для сухого и смоченного контакта цилиндра с плоскостью свидетельствуют об увеличении силы трения после включения электрического тока или магнитного поля, рисунок 1.9.

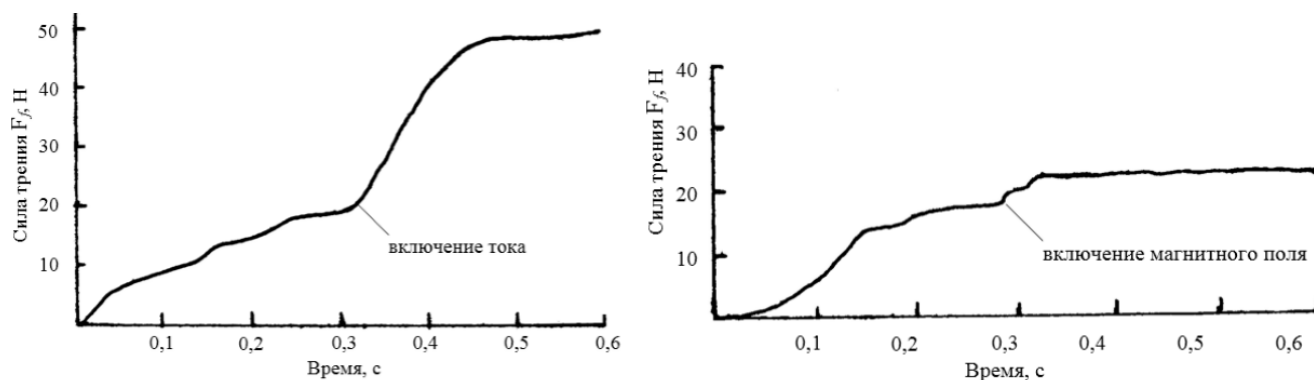


Рисунок 1.9 – Осциллограмма силы трения (нагрузка на контакт 250 Н) [87]

Последующие исследования влияния магнитного поля на триботехнические свойства относятся к процессу прокатки [88]. В книге, посвящённой прокатке металлов в постоянных магнитных полях, Л.Г. Делюсто рассматривает возможность изменения коэффициента трения с помощью магнитного поля. Полученные результаты объясняются тем, что магнитострикционные процессы развиваются пропорционально напряжённости магнитного поля, это способствует упругому деформированию и изменению субмикрошероховатости поверхности. Требуемая шероховатость при прокатке металла поддерживается за счёт воздействия магнитного поля. Ряд предложений по улучшению износостойкости и снижению трещинообразования материала основан на непрерывном намагничивании в процессе эксплуатации, а также понижении амплитуды и частоты колебаний для областей, разделённых микротрещиной [89, с. 53].

Опытные данные по перемещению на участке машинного трения металлов показывают, что при трении ферромагнетиков (Fe) со смазочным материалом в постоянном магнитном поле коэффициент трения возрастает на 17 %, а для случая перемещения диамагнитных (Cu) и парамагнитных (Al) тел по поверхности ферромагнитного при тех же условиях коэффициент трения снижается на 44 %. Меньший коэффициент трения объясняется увеличением зазора между немагнитным телом и магнитным валком, что приводит к снижению силы сцепления и магнитной проницаемости в зоне контакта. Сила трения без магнитного поля создаётся зацеплением неровностей, магнитное трение обуславливается силой электромагнитного прижатия и изменением состояния контактных поверхностей. Дополнительное сцепление прокатных валков с полосой в магнитном поле объясняется наличием между трущимися поверхностями ферромагнитной жидкой прослойки с частичками металлической пыли. Изменение параметров магнитного поля в зоне деформации позволяет поддерживать требуемую величину коэффициента трения. Коэффициент трения между валками и полосой при прокатке в постоянном магнитном поле имеет параболическую зависимость от напряжённости и индукции магнитного поля [89, сс. 131-147].

От величины трения зависит существование установившегося процесса, производительность и качество прокатки. В работе [90] было отмечено, что физические процессы при захвате валками полосы и дальнейшем её протягиванием схожи со сцеплением колеса локомотива и рельса. В обоих случаях решающую роль играет коэффициент трения в зоне контакта деформируемых тел.

Гипотезу изменения состояния узла трения в постоянном магнитном поле исследовал И.А. Кравец. Выдвинутая гипотеза о влиянии внешнего энергетического источника, на зону трения базируется на научных постулатах о магнетизме. Результаты показывают, что использование направленного магнитного поля позволяет, при расположении образца против южного полюса, увеличить коэффициент трения до 0,15, против северного коэффициент трения достигает величины от 0,07 до 0,09. Трибологические процессы совместно с внешними энергетическими воздействиями на узел трения способствуют активному перемещению материала. В период нестабильного состояния поверхностей трения внешнее энергетическое воздействие позволяет изменять строение материалов [91, 92].

Пропускание магнитного потока между металлами способствует повышению энергии в поверхностных слоях и приконтактных областях, благодаря чему происходит активация электрической структуры материала. Магнитная активация контакта по сравнению с тепловой безинерционна [93, 94].

В настоящее время наука, а в след за ней технологии и промышленность развиваются по пути придания материалам требуемых свойств. Широкую огласку получают нанотехнологии, действующие на объект на атомарном уровне, в то же время достоверная теория макроскопического влияния физических полей на микроявления в структуре материала разработана далеко неполно. В результате анализа литературных источников выявлен ряд исследований, которые отображают способность магнитного поля оказывать влияние на физико-механические свойства материалов [47-92].

1.3 Способы повышения сцепления колёс локомотива с рельсами

Сцепные свойства колеса с рельсом имеют стохастический характер, главным образом зависят от нагрузки и структурно-реологических свойств поверхности [4]. Согласно основному закону локомотивной тяги параметр сцепления колеса с рельсом ограничивает силу тяги и тормозную силу. Повышение сцепных свойств в паре колесо локомотива – рельс основывается на следующих принципах: использование в зоне контакта третьего тела, изменение силы прижатия колеса к рельсу догрузкой 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 [90].

На сегодняшний день подсыпка песка в зону контакта колеса с рельсом это самый распространённый способ повышения сцепления. Песок является экологически безопасным и дешёвым материалом, однако, этому способу присущи недостатки. Ограничена возможность использования песка на стрелочных переводах, песок способствует загрязнению и снижению электрического сопротивления балласта, повышению износа узлов и деталей за счёт абразивного воздействия. Возникает потребность в пунктах экипировки песком, инерционность механизма подсыпки песка не позволяет предотвратить начало буксования.

Известны и другие способы повышения сцепления колеса с рельсом за счёт введения в зону контакта третьего тела, состоящего из различных веществ: графита, цемента, глицерина, битума, стекла и др. [95-98]. Активаторы трения модифицируют физико-химические свойства поверхности, кроме того, в зону контактного пятна подаются абразивные частицы [99]. На активаторы трения накладываются требования точности и объёма нанесения слоя, соблюдения условий охраны окружающей среды, исключения схватывания и вырывания материала. Применение синтетических материалов для изготовления колёс позволяет повысить коэффициент сцепления, однако, контактные напряжения приводят к интенсивному износу и повышению эксплуатационных расходов.

Функцию перераспределения силы тяги между осями выполняет групповой тяговый привод, используемый на дизель-поездах (Д1, ДР1А), маневровых тепловозах с гидравлической передачей (ТГМ4, ТГМ6, ТГМ23), промышленных локомотивах (ТЭУ630) [103]. Потележечное и поосное регулирование касательной силы тяги стало возможным с внедрением микропроцессорных систем управления, что позволяет индивидуально регулировать силу тяги, исходя из сцепных возможностей каждой колёсной пары.

Перераспределение осевых нагрузок и догружение колёсных пар реализуются путём внесения изменений в конструктив подвижного состава, повышения сцепного веса. При конструкции пути и скоростях движения поездов, свойственных магистральному транспорту, догружение колёсных пар ограничивается предельной осевой нагрузкой [100]. Большие возможности данный способ находит в маневровой работе и на путях промышленного транспорта [101]. Известно устройство увеличения давления колёс транспортного средства на рельсы, содержащее закрепленные на оси и размещенные у колеса, в непосредственной близости от зоны контакта, источники магнитного потока [102].

Испытания тепловоза ТЭМ2-1983 с электромагнитным устройством повышения сцепления, размещённом на тележке, проводились в 1976 году. После этого, по заказу Главного управления локомотивного хозяйства МПС, Брянский машиностроительный завод в 1978 году изготовил тепловоз ТЭМ2УС-001. Тепловоз испытывался во ВНИТИ. Тележки тепловоза оборудованы электромагнитами, сила дополнительного прижатия создавалась за счёт прохождения магнитного потока через колёса и рельсы. Ранее идея электромагнитного повышения сцепления проверялась на паровозах серии СО и электровозах ВЛ23 [103].

Следует отметить, что испытания магнитных усилителей сцепления на подвижном составе проводились без исследования магнитных цепей тележек локомотива и, как следствие, возможности устройств ограничивались причинами конструкционного характера: трудностью размещения габаритных обмоток, значительными воздушными зазорами, рассеянием магнитного поля в элементах тележки.

Химические, физические и электрические (электроискровые и плазменные) способы увеличения сцепления между колесом и рельсом заключаются в воздействии на поверхности трения. В ряде из них механические свойства металлов изменяются за счёт химических и тепловых реакций. Ввиду низкой стабильности данные способы не нашли широкого применения на железнодорожном транспорте [104, 105].

Известен способ увеличения сцепления колеса с рельсом, основанный на нагреве поверхностных загрязнений низкотемпературной плазмой перед прохождением поезда. Однако, из-за неустойчивости плазмы способ не позволяет получать стабильные величины коэффициента сцепления. Кроме того, недостатком плазменного воздействия является высокая сложность всей системы, ограниченная регулировка мощности, необходимость ввода в горелку газа и использования водяного охлаждения [106].

Известен способ повышения сцепления колёс транспортного средства с рельсами, заключающийся в нагреве поверхностных загрязнений колёс и рельсов. На поверхностные загрязнения воздействуют высокочастотным электромагнитным полем, энергию которого направляют на поверхности трения колёс и рельсов, при этом мощность излучения высокочастотного электромагнитного поля определяют на основе исходного коэффициента трения, исходной температуры и влажности в зоне трения колеса с рельсом, а также скорости движения [7].

Для научно-технических коллективов задача исследования области контакта колеса и рельса с целью управления трением остаётся актуальной. Применение усилителей сцепления колёс с рельсами сводится к исключению режимов работы тягового привода в условиях буксования и снижения уровня фрикционных автоколебаний [13, 107-112]. Таким образом, с точки зрения энергопотребления, возрастает энергоэффективность работы локомотива. Устройства повышения сцепления нового поколения должны основываться на управлении свойствами рабочих поверхностей колеса и рельса [113-125]. Поверхностям требуемые свойства могут придаваться как в зоне контакта, так и вне зоны контакта.

Проведённый анализ в области улучшения сцепления колёс с рельсами и изменения физико-механических свойств металлов при намагничивании позволил в некоторой степени судить о возможных влияниях постоянного магнитного поля на тяговые качества тепловозов, но совместное воздействие условий эксплуатации и намагничивания до сих пор не исследовалось.

Настоящая диссертационная работа заключается в разработке и совершенствовании научно обоснованных методов и способов улучшения тяговых качеств тепловозов воздействием постоянного магнитного поля на зоны контакта колёс с рельсами, за счет исследования эффекта влияния магнитного поля на взаимодействие стальных пар трения, определения геометрических параметров контактирования колёс с рельсами, разработки мероприятий по намагничиванию зон контакта колёс тепловоза с рельсами в условиях эксплуатации.

В период с 2009 по 2017 годы выполнялся анализ состояния изучаемого вопроса, осуществлялся сбор экспериментальных данных и контролируемых параметров, построение модели взаимодействия колёс с рельсами, исследование магнитных цепей. Диссертационные исследования проводились на путях сервисного локомотивного депо «Елец», в лабораториях кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета и кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта (МИИТ). Был испытан опытный образец индукторного устройства увеличения сцепления колёс с рельсами. Изучению на трибометрических установках подвергались образцы, выполненные из бандажной стали колёсных пар локомотивов.

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Работы [126-128] подготовлены единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве: [13, 94, 107-125] – постановка задач исследований, обоснование идеи технических решений, определение направлений дальнейших исследований; [123, 129-135] – разработка моделей и алгоритмов реализации; [90, 136-138] – проведение расчетов и обобщение полученных результатов.

1.4 Выводы по разделу 1

1. Модель контакта упругих тел, основанная на законах контактной механики и теории Герца, позволяет расчётным путём определить приблизительные размеры контактного пятна. Для уточнения геометрических параметров зоны контакта колеса с рельсом следует прибегнуть к методам компьютерного моделирования.
2. Большинство из распространённых методов повышения сцепления колёс железнодорожного подвижного состава с рельсами обладают существенными недостатками. Современные пути улучшения механических и эксплуатационных свойств материалов заключаются во внешних энергетических воздействиях.
3. Полученные в разные годы экспериментальные подтверждения говорят о влиянии магнитных полей на физико-механические свойства металлов. Рассмотренные исследования показывают, что воздействие магнитного поля на контакт стальных пар трения повышает коэффициент и силу трения, следовательно, коэффициент сцепления колеса с рельсом также может быть повышен.

2 ТРИБОМЕТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ПАР ТРЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В данном разделе приведены результаты экспериментальных исследований влияния постоянного магнитного поля на коэффициент трения образцов из стали. Дано описание установок и методик проведения эксперимента. Определены характеристики магнитного поля, получены зависимости коэффициента трения от магнитного поля в зоне контакта.

2.1 Установка для исследования трения качения со скольжением

Физическое моделирование широко используется в практической трибологии, оно заключается в исследовании физически подобных процессов на установках, позволяющих сохранить природу физических явлений и воспроизводящих их в других физических и геометрических размерах. Особенность трибологической модели состоит в одинаковой природе явления с оригинальным объектом, используются такие же условия и материалы пар трения [41, с. 76].

Результаты моделирования связываются с реальным объектом посредством масштабного фактора. Моделирование трибологических процессов на экспериментальных установках позволяет воссоздавать тождественные условия испытаний и получать выходные характеристики коэффициента трения от режима испытаний, аналогичные характеристикам оригинальных объектов. Можно назвать следующие основные достоинства использования лабораторных установок: экономия материальных и временных ресурсов, снижение затрат на создание и эксплуатацию стенда [41].

Исследования стальных пар трения в условиях трения качения со скольжением при воздействии магнитного поля включают экспериментальную часть и определение параметров магнитного поля с использованием конечноэлементного пакета ANSYS Maxwell [90, 136].

Экспериментальные исследования проводились на трибометрической установке в лаборатории кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета. Данные исследований подтверждаются актом внедрения, который приведён в приложении Б.

Парой трения на установке (рисунок 2.1 а) является колесо 6 и рельс 2. Источником намагничивающей силы является индуктор с обмоткой 3. Две катушки 140 и 200 витков, намотанных на П-образный магнитопровод (рисунок 2.1 б) во взаимно перпендикулярных плоскостях. Обмотки катушек выполнены медным проводом диаметром 1 мм. Колесо представлено цилиндром диаметром 75 мм и высотой 10 мм, приводится во вращение электродвигателем 5. Электродвигатель размещён на поворотной платформе 4 [90, 136].

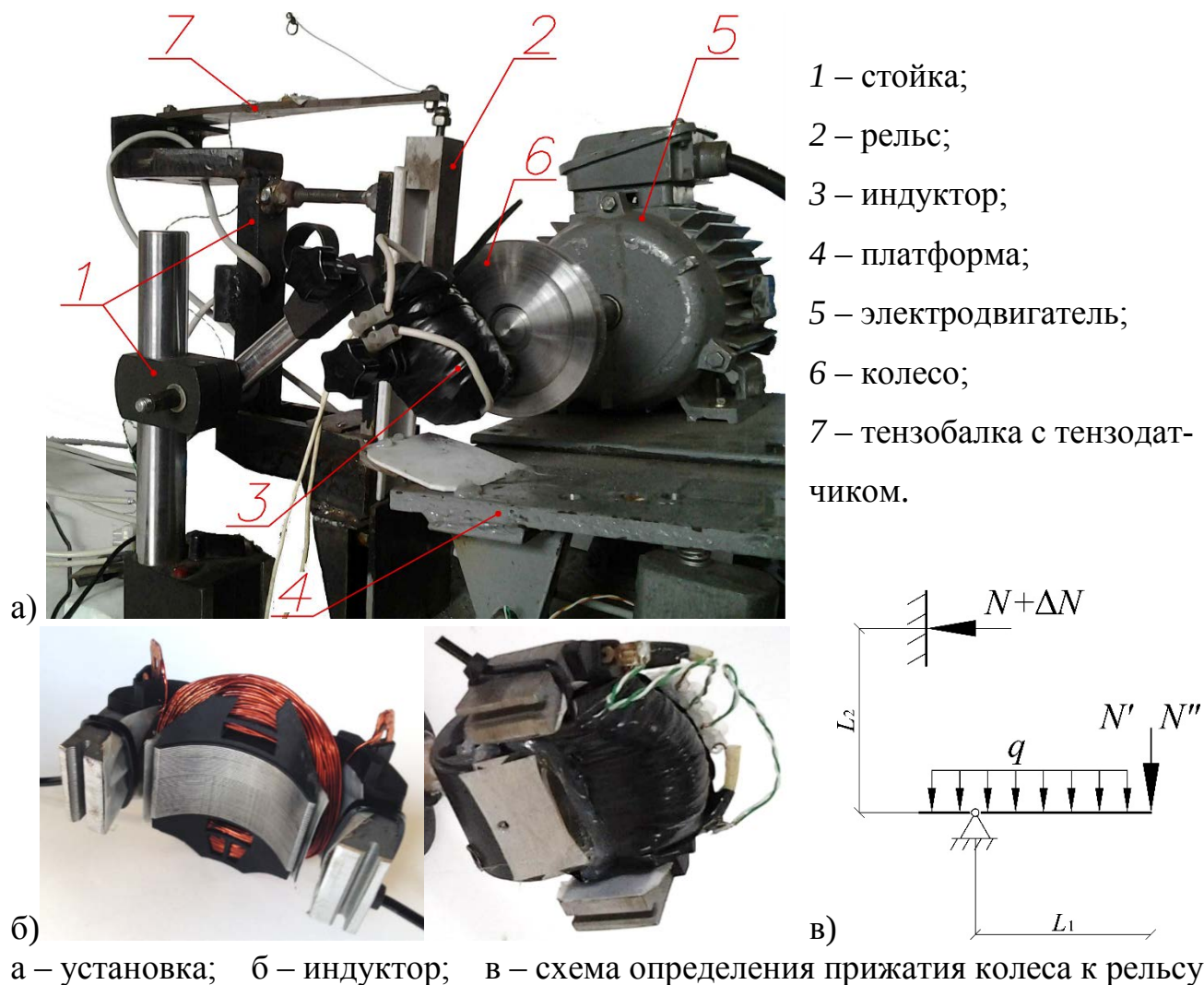


Рисунок 2.1 – Установка для исследования трибологических характеристик в условиях трения качения со скольжением при воздействии магнитного поля

Рельс выполнен бруском прямоугольного сечения с выточкой, соединён с тензобалкой 7, закреплённой на стойке 1. На тензобалке расположен тензодатчик, регистрируемые усилия передаются на тензометрическую станцию в виде сигнала. Тензометрическая станция усиливает сигнал и передаёт через интерфейс на персональный компьютер, где данные преобразуются в графический вид. К стойке рельс прижимается через прокладку с низким коэффициентом трения, поэтому сила трения колеса о рельс сообщается тензобалке без значительных потерь на трение рельса об опорную поверхность.

Прижатие колеса к рельсу без намагничивания N и при намагничивании $N + \Delta N$ определяется с помощью динамометра, подсоединённого к поворотной платформе, по схеме на рисунке 2.1 в. Показание динамометра без магнитного поля N' и с магнитным полем N'' фиксируется в момент отрыва колеса от рельса. Величина силы дополнительного прижатия колеса к рельсу определяется из выражения $\Delta N = (N'' - N') \cdot L_1/L_2$. Догрузение имеет квадратичную зависимость от индукции в зоне контакта [90], рисунок 2.2.

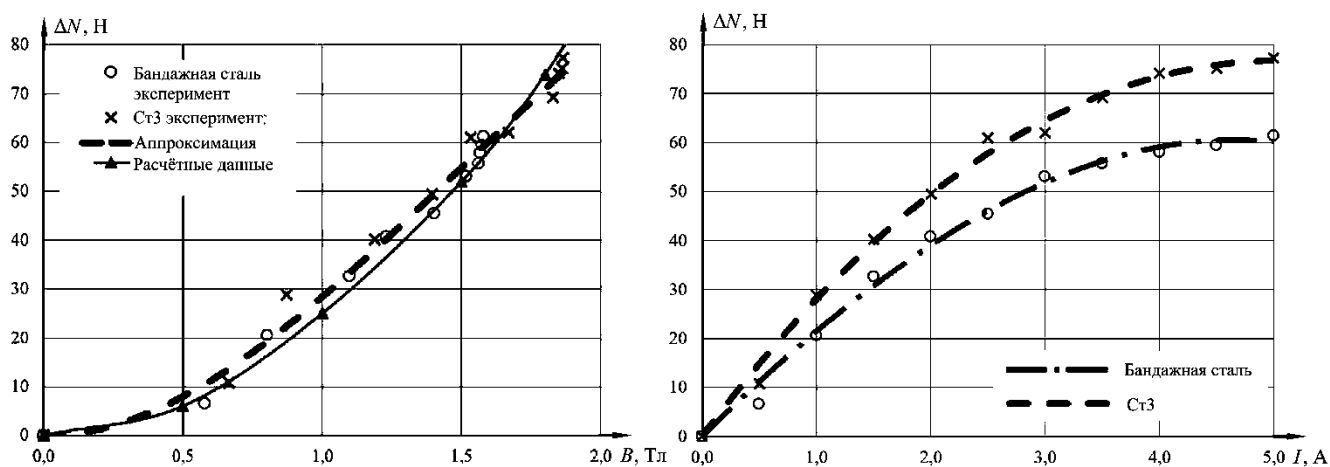


Рисунок 2.2 – Сила дополнительного прижатия колеса к рельсу от индукции в зоне контакта и тока катушки

Магнитная энергия, сосредоточенная в воздушном зазоре, создаёт в зоне контакта колеса с рельсом силу дополнительного электромагнитного притяжения $\Delta N = 0,5BHs$, которая зависит от индукции B , напряжённости H магнитного поля и площади s [139].

Основная задача экспериментов заключалась в сборе данных величины намагничивающего тока, силы прижатия и силы трения в трибологической системе колесо – рельс без намагничивания и при различных режимах намагничивания зоны контакта. Каждый опыт выполнялся в следующей последовательности: подготовка установки к эксперименту, подключение индуктора к источнику постоянного напряжения и установка требуемого значения силы тока в обмотке, пуск электродвигателя, регистрация силы трения для заданных режимов намагничивания, выключение электродвигателя, измерение динамометром усилия отрыва колеса от рельса, снятие напряжения с катушки индуктора. Этап подготовки включал тарирование тензометрической системы, очистку поверхностей трения, проверку работоспособности средств измерения, осмотр электрических цепей. В части опытов магнитное поле подавали и снимали между этапами пуска и выключения двигателя. Опыты № 12 и 13 соответствуют позднему включению магнитного поля, а опыт № 4 – раннему отключению магнитного поля [90], рисунок 2.3.

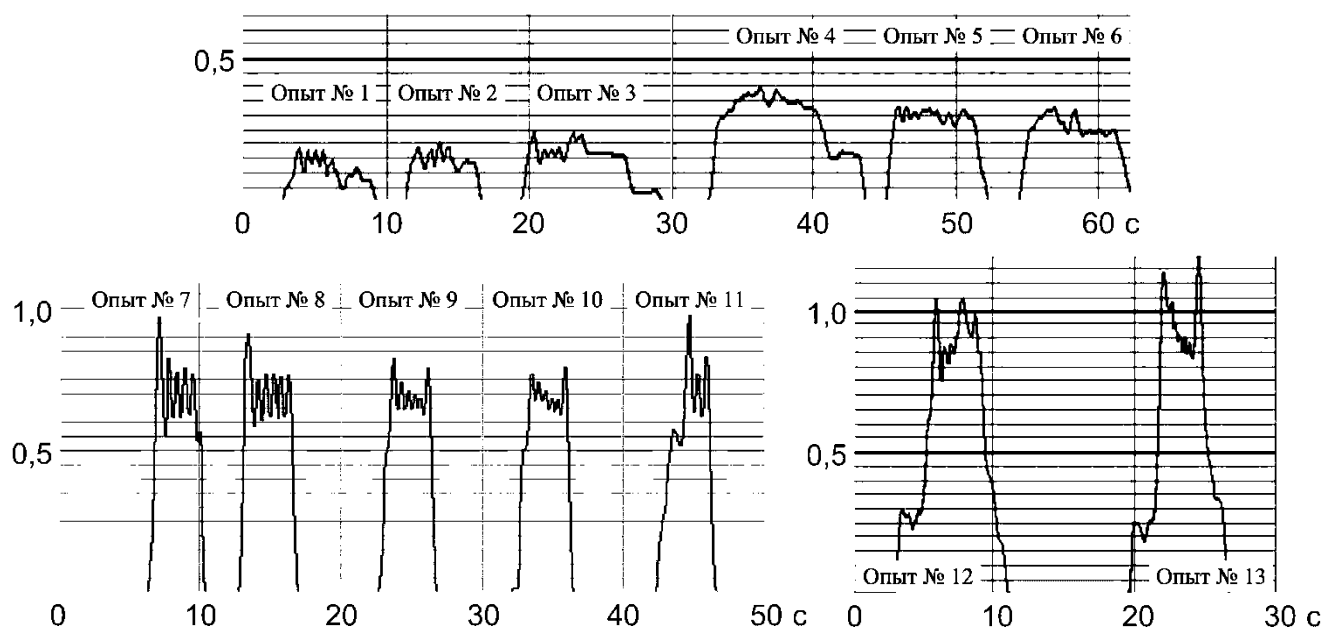


Рисунок 2.3 – Осциллограммы изменения сил трения (относительные единицы)

В процессе эксперимента воссоздавалась потеря сцепления колеса с рельсом и срыв в буксование, при этом искажалась регистрируемая сила трения. О надёжной регистрации свидетельствуют явные подъёмы и спады при смене режима намагничивания, пульсация силы трения относительно среднего значения.

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 колёсных 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 [90].

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, однако, дополнительное прижатие не объясняет весь прирост трения, поскольку 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 $\Delta\mu$. По мнению авторов [90], эта разница представляет собой то, что в законе Амонтона – Кулона называется адгезионным схватыванием поверхностей, а И.В. Крагельским объясняется наличием молекулярной компоненты коэффициента трения.

Представим прирост силы трения ΔF как 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.

$$\Delta F = \mu \cdot \Delta N + \Delta\mu \cdot \Delta N + \Delta\mu \cdot N. \quad (2.1)$$

Подстановка экспериментальных значений сил трения и прижатия в выражение (2.1) показывает, что в режиме начального насыщения коэффициент трения повышается на 13 %, при полном насыщении – на 22 %. Таким образом, увеличение магнитного потока, проходящего через зону контакта колеса с рельсом, способствует возрастанию коэффициента трения. Зависимость относительного изменения коэффициента трения от индукции магнитного поля в зоне контакта имеет квадратично – кубический вид [90], рисунок 2.4.

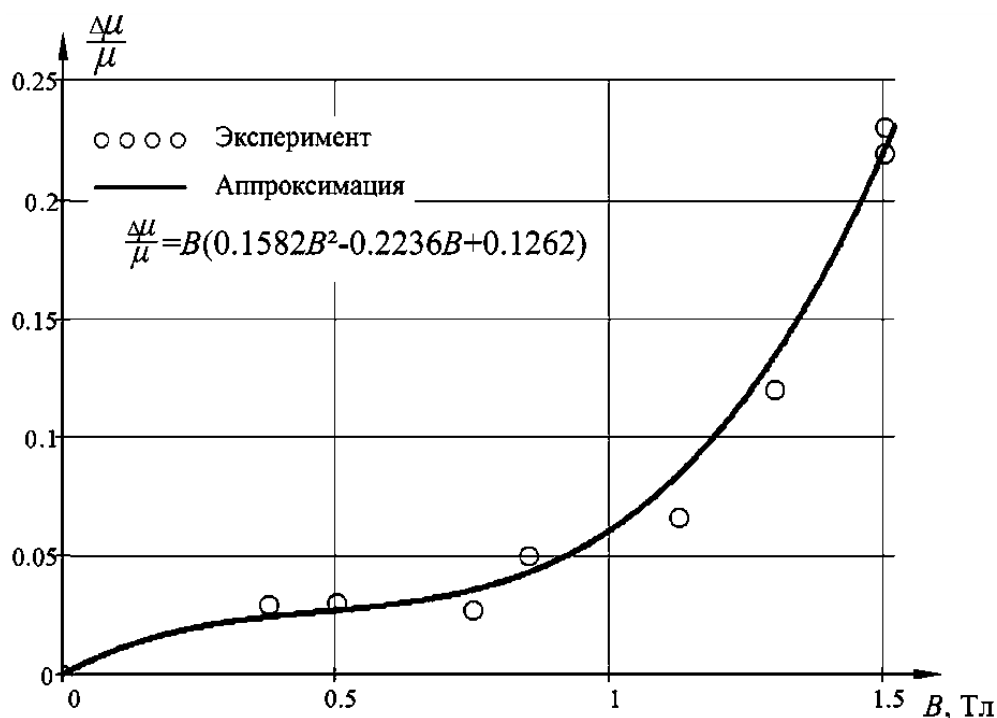
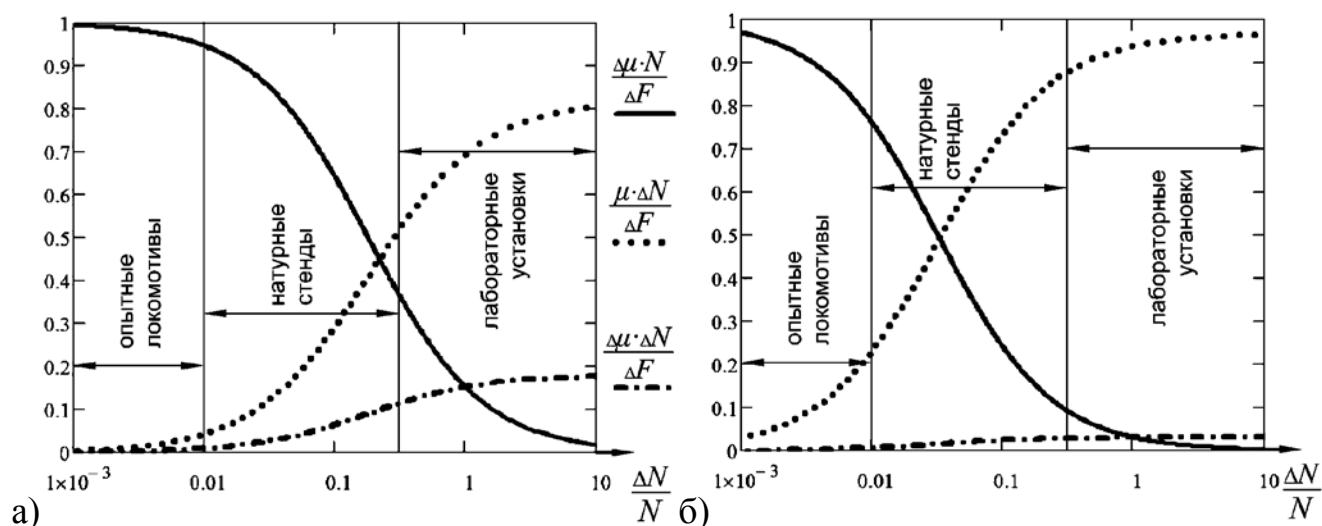


Рисунок 2.4 – Зависимость относительного изменения коэффициента трения от индукции магнитного поля в зоне контакта

В зависимости от типа установки в выражении (2.1) может преобладать первое или последнее слагаемое. Лабораторная установка характеризуется небольшой силой прижатия колеса к рельсу N , компактностью, малой мощностью [90]. Натурный стенд отличается реальными габаритными размерами, средней силой N [140]. Опытный локомотив – значительной силой прижатия и мощностью, реальными размерами [103, с. 154]. Для каждого эксперимента физические процессы подобны, что позволяет выявить коэффициент трения, учитывая влияние той или иной составляющей силы трения. Соотношения сил трения для разного типа установок, характерные для режимов намагничивания зоны контакта колеса с рельсом до индукции 0,7 и 1,5 Тл, приведены на рисунке 2.5.

В лабораторной установке преобладает трение, создаваемое основным коэффициентом трения и догрузением $\mu \cdot \Delta N$, трение, создаваемое увеличением коэффициента трения $\Delta\mu \cdot (\Delta N + N)$, изменяется в пределах от 5 до 50 % от ΔF . У натурального стенда указанные составляющие трения варьируются от 50 до 95 % от ΔF . Для опытного локомотива от 80 до 99 % дополнительного трения, обусловлено увеличением коэффициента трения на величину $\Delta\mu$ [90].



а – индукция в зоне контакта 0,7 Тл; б – индукция в зоне контакта 1,5 Тл

Рисунок 2.5 – Соотношение составляющих силы трения ΔF

При оценке общей точности замера регистрируемой величины силы трения, каждая из составляющих систематических погрешностей принимает характер случайной величины, а её предельное значение ε становится частной погрешностью. Предельную погрешность выполняемых измерений определим, сложив частные погрешности: от тензодатчиков – 1 %, от соединительных проводов – 1 %, от тензометрической станции – 3 %, от неточности обработки осциллограмм – 3 %

$$\varepsilon = \sqrt{1^2 + 1^2 + 3^2 + 3^2} = 4,47 \text{ \%}.$$

2.2 Определение характеристик магнитного поля

Важно понимать распределение и параметры магнитного поля в установке, конечной целью при расчёте магнитной системы является определение характеристик и величины поля на участке магнитной цепи. Для плоских структур математические решения получают, основываясь на некоторых допущениях, аналитических упрощениях. Применение упрощенных моделей достаточно на этапе предварительного расчёта. Данный подход приводит к приближённому решению и не может быть применён к магнитным цепям, которые характеризуются: сложной геометрией, многообразием границ раздела сред, нелинейными свойствами [141]. В то

же время актуальной задачей является расчёт трёхмерных объектов, подверженных намагничиванию. В данном случае одномерные аналитические решения не могут быть применены. Поставленные задачи приводят к решению дифференциальных уравнений Максвелла для квазистатических электромагнитных полей.

Для повышения степени достоверности математических моделей требуется глубокий анализ магнитного поля в ферромагнитных средах на основе применения численных методов, решения нелинейных краевых задач. Такие исследования позволяют по-новому построить математические модели и учесть особенности процессов, возникающих с высокими нагрузками, нетипичными конфигурациями и соотношениями геометрических размеров.

Численный анализ охватывает широкий спектр задач, следует отметить, что численные методы требуют значительных вычислительных ресурсов и с появлением высокопроизводительных компьютеров оказались наиболее востребованными [142]. На сегодняшний день известны программные продукты для расчёта электромагнитного поля: FLUX3D, JMAG, EMS, Comsol, Elcut, FEMM, Ansys и другие, позволяющие с высокой точностью выполнять расчёт объёмных магнитных систем численными методами [143, 144].

При анализе полей и процессов в электромеханических системах широкое распространение получил метод конечных элементов (МКЭ). Основным принцип МКЭ заключается в том, что пространство разбивается на отдельные части в форме треугольников, прямоугольников, а при трёхмерной задаче – параллелепипедов, тетраэдров, которые образуют сетку конечных элементов. Сетка аппроксимирует границы расчётной области, размер сетки зависит от точности [137, 145].

Конечные элементы не перекрывают друг друга, каждый элемент сетки имеет три вершины-узла и задаётся отдельным полиномом. Скалярный магнитный потенциал характеризуется коэффициентами, постоянными для данного полинома. Магнитный потенциал $\varphi_{m(i)}$ описывается линейным полиномом первого порядка $\varphi_{m(i)} = a_{(i)} + b_{(i)}x + c_{(i)}y$ с коэффициентами i -го элемента $a_{(i)}, b_{(i)}, c_{(i)}$. Задача МКЭ сводится к определению коэффициентов для каждого элемента посредством решения

нелинейного дифференциального уравнения в частных производных для векторного магнитного потенциала A . В результате появляется возможность определить значение искомого параметра в узлах и рёбрах сетки. В условиях плоско-параллельной задачи для двумерного магнитного поля уравнение Пуассона имеет следующий вид [143, 146, 147].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right), \quad (2.2)$$

где A – векторный магнитный потенциал; μ_x, μ_y – компоненты тензора магнитной проницаемости среды; H_{cx}, H_{cy} – составляющие коэрцитивной силы; j – вектор плотности тока.

Приняв, что структура материала изотропна, запишем пропорциональные зависимости плотности тока от напряжённости электрического поля и потенциала электромагнитного поля:

$$j = \sigma E = -\sigma \cdot \left(\nabla \varphi + \frac{\partial A}{\partial t} \right), \quad (2.3)$$

где σ – удельная проводимость среды; E – напряжённости электрического поля; φ – скалярный потенциал.

В электродинамике, когда скорость движения тела сравнительно мала, можно воспользоваться способами расчёта для неподвижных тел. В условиях электростатики $\operatorname{div} A = 0$, при этом уравнение (2.3) упрощается $j = \sigma E = -\sigma \cdot \nabla \varphi$ [143, 148].

Источник намагничивающей силы определяется током в заданной точке. Распределение тока описывается граничными условиями Неймана, характеризующими плотность тока, или посредством ампер-витков катушки. Связь плотности тока j и намагничивающей силы $n \cdot I$ имеет пропорциональную зависимость, коэффициентом пропорциональности является величина, обратная площади поперечного сечения катушки S [143].

Замена краевой задачи вариационной сводится к минимизации нелинейного энергетического функционала. Расчётные данные получаются в результате минимизации функционала в области Ω , которая предварительно разделена на произвольное число элементов.

$$F = \int_{\Omega} \left(\int_0^{B_x} v \cdot B_x \cdot dB_x + \int_0^{B_y} v \cdot B_y \cdot dB_y \right) \cdot d\Omega - \int_S A_z \cdot \Delta \cdot d\Omega. \quad (2.4)$$

Магнитная индукция $B = \text{rot } A$ представлена ротором потенциала. Потенциал внутри произвольного элемента m с вершинами i, j, k , имеющими координаты $(x_i, y_i), (x_j, y_j), (x_k, y_k)$, определяется значениями A_z в вершинах [143, 149].

$$A_z = \frac{(a_i + b_i \cdot x + c_i \cdot y) \cdot A_{zi} + (a_j + b_j \cdot x + c_j \cdot y) \cdot A_{zj} + (a_k + b_k \cdot x + c_k \cdot y) \cdot A_{zk}}{2S_{\Delta}}, \quad (2.5)$$

где: A_{zi}, A_{zj}, A_{zk} – векторный магнитный потенциал в вершинах треугольника m ;

$$a_i = x_j \cdot y_k - x_k \cdot y_j, \quad b_i = y_j - y_k, \quad c_i = x_k - x_j, \quad a_j = x_k \cdot y_i - x_i \cdot y_k, \quad b_j = y_k - y_i, \quad c_j = x_i - x_k,$$

$$a_k = x_i \cdot y_j - x_j \cdot y_i, \quad b_k = y_i - y_j, \quad c_k = x_j - x_i - \text{коэффициенты базисной функции};$$

$$S_{\Delta} = \frac{(x_i \cdot b_i + x_j \cdot b_j + x_k \cdot b_k)}{2} - \text{площадь треугольника } m.$$

В треугольнике присваиваются постоянные значения B_x и B_y и определяется

$$|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial A_z}{\partial y}\right)^2 + \left(-\frac{\partial A_z}{\partial x}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{c_i \cdot A_{zi} + c_j \cdot A_{zj} + c_k \cdot A_{zk}}{2S_{\Delta}}\right)^2 + \left(\frac{b_i \cdot A_{zi} + b_j \cdot A_{zj} + b_k \cdot A_{zk}}{-2S_{\Delta}}\right)^2}.$$

Минимум функционала находится из условия $\frac{\partial F^m}{\partial A_{zp}} = 0$. Постоянство суммарного

заряда замкнутой системы в электродинамике описывается уравнением непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot j = 0, \text{ где } \nabla \cdot j - \text{дивергенция плотности тока, а } \frac{\partial \rho}{\partial t} - \text{изменение плотности}$$

заряда. В магнитостатике $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, при этом уравнение непрерывности вырождается в условие соленоидальности поля $\nabla \cdot j = 0$ [143, 146-149].

Материал магнитопровода должен соответствовать следующим требованиям: малые потери в сердечнике, высокая плотность потока сатурации, большая магнитная проницаемость. Ферромагнетики хорошо зарекомендовали себя в качестве магнитной компоненты и являются наиболее популярным материалом при изготовлении индукторных устройств и электрических машин. Конструкционные стали на основе железа являются ферромагнетиками. Основные кривые намагничивания $B(H)$ сталей, используемых в данной работе, приведены на рисунке 2.6.

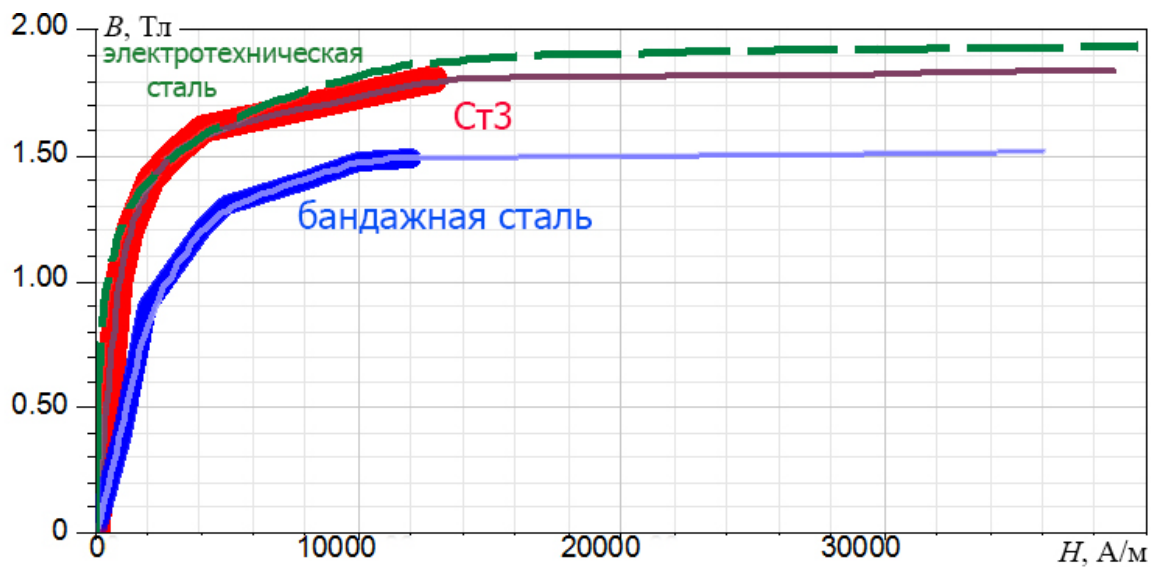


Рисунок 2.6 – Основные кривые намагничивания сталей

Магнитопровод из электротехнической стали прилегает к рельсу и отстаёт от колеса на 1 мм [90], рисунок 2.7.

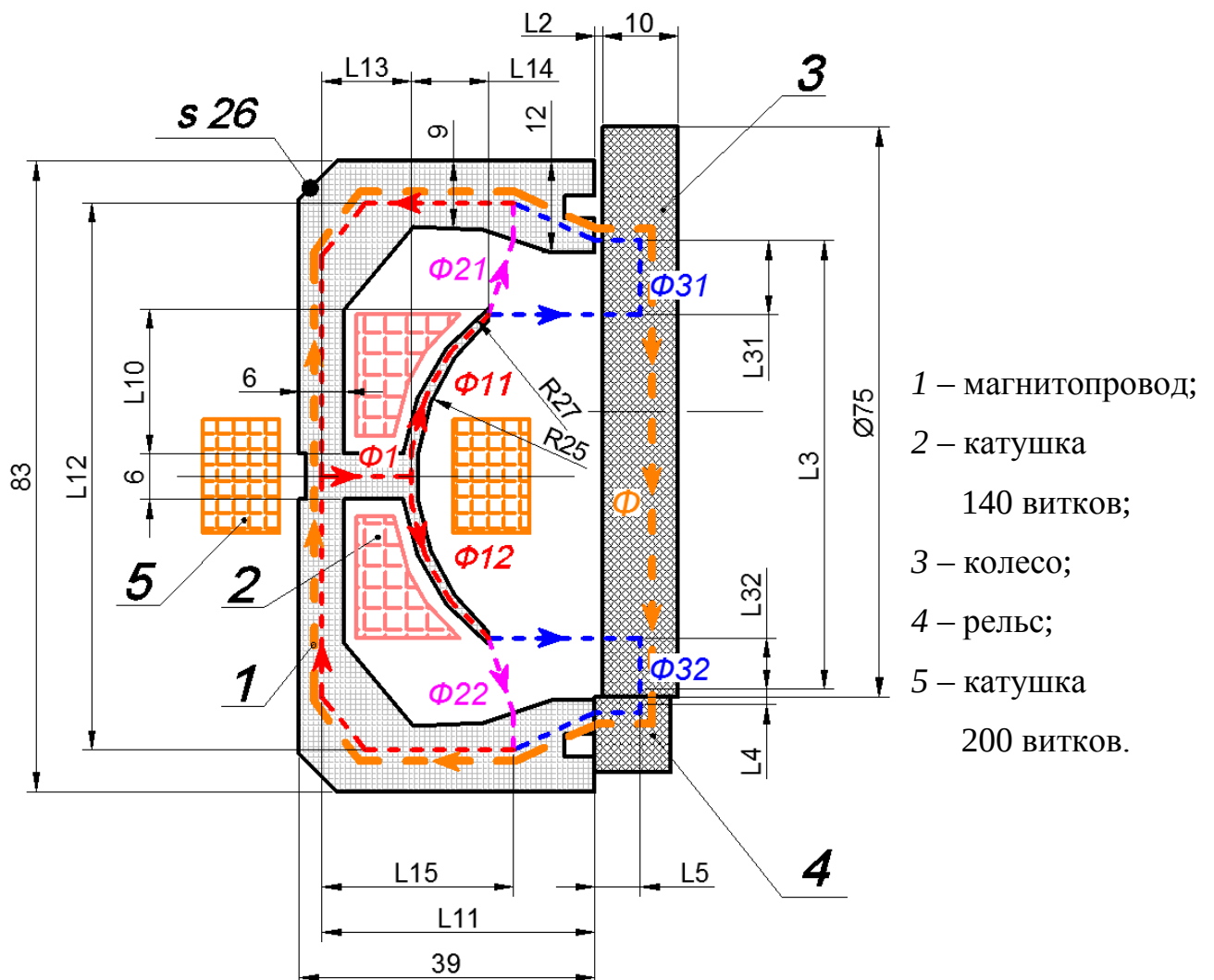


Рисунок 2.7 – Расчётная магнитная цепь

Эксперименты выполнены с образцами из бандажей стали и Ст3 для случаев отдельного и совместного использования катушек. При совместном использовании катушки подключены последовательно. Величина протекающих по обмоткам катушек токов задаётся лабораторным автотрансформатором (ЛАТР).

При включении индуктора установки основной магнитный поток замыкается через магнитопровод 1, колесо 3 и рельс 4. При совместном использовании катушек, они подключены таким образом, чтобы потоки в нижней части магнитной цепи (зона контакта колеса с рельсом) были направлены в одну сторону. При этом потоки в верхней части магнитной цепи направлены встречно и концентрация силовых линий магнитного потока в нижней части магнитной цепи больше, чем в верхней [137].

Продольное расположение первой катушки 2 способствует разделению магнитного потока на части. Магнитная цепь становится разветвленной (состоит из девяти ветвей), основной поток проходит в обход колеса и рельса (они зашунтированы малым воздушным зазором). Максимальное значение магнитодвижущей силы (МДС) первой катушки составляет 700 А-витков, что соответствует току 5 А и 140 виткам. Одиночное использование первой катушки не позволяет достигнуть насыщения зоны контакта колеса с рельсом, индукция магнитного поля находится в пределах 1 Тл, рисунок 2.8.

Поперечное расположение второй катушки 5 (рисунок 2.7) способствует тому, что основной магнитный поток проходит через зону контакта колеса с рельсом. Поток рассеяния составляет малую часть основного потока, замыкается через подковообразный элемент магнитопровода и значительный воздушный зазор от 45 до 50 мм. Поскольку магнитное сопротивление потока рассеяния велико, то в расчётах им можно пренебречь [137].

Максимальное значение МДС второй катушки составляет 1000 А-витков, что соответствует току 5 А и 200 виткам. Одиночное использование второй катушки позволяет достигнуть насыщения зоны контакта колеса с рельсом при токе от 2 до 2,5 А, рисунок 2.9.

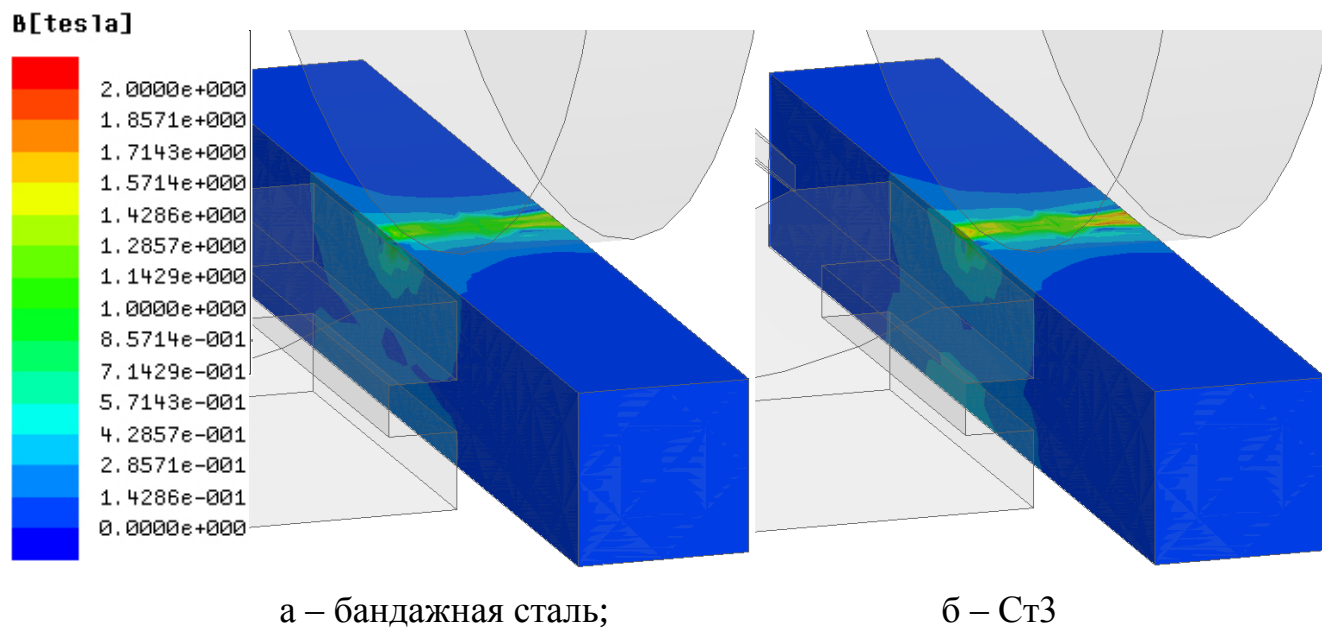


Рисунок 2.8 – Насыщение зоны контакта колеса с рельсом при продольном расположении катушки 140 витков

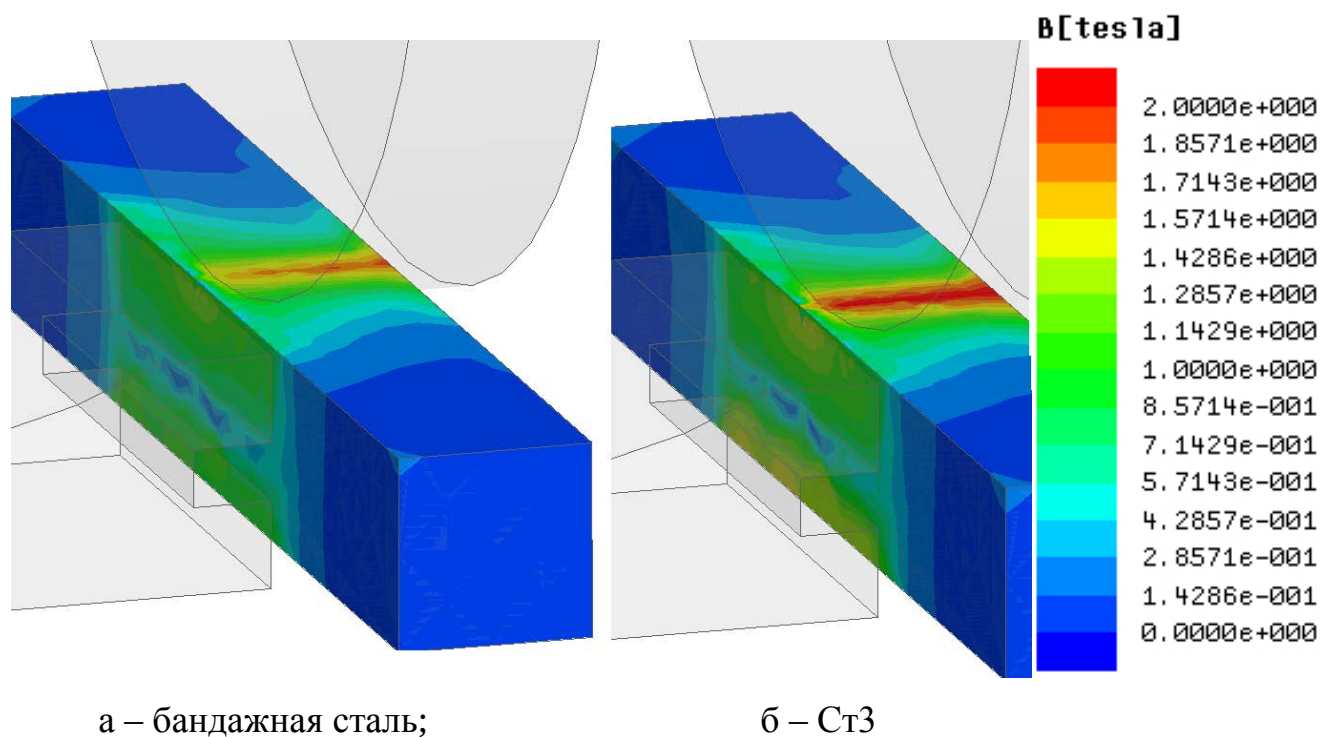
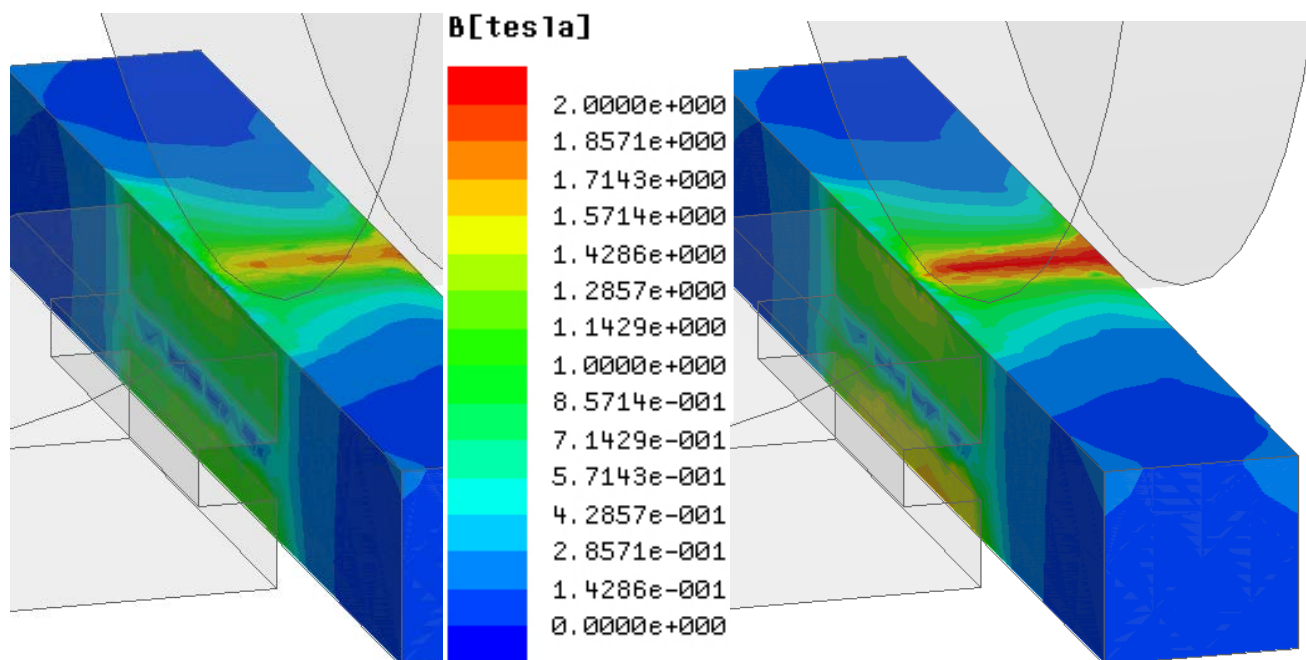


Рисунок 2.9 – Насыщение зоны контакта колеса с рельсом при поперечном расположении катушки 200 витков.

Совместное использование двух катушек не имеет существенного отличия от одиночного использования второй катушки, в то же время, наблюдается незначительный прирост индукции в зоне контакта колеса с рельсом, рисунок 2.10.

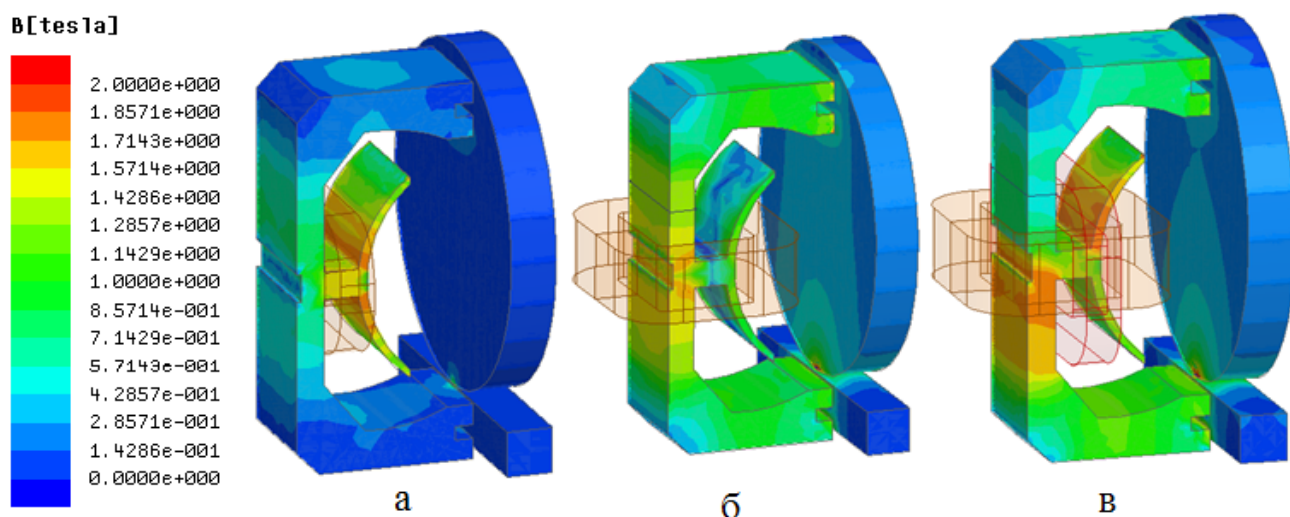


а – бандажная сталь;

б – Ст3

Рисунок 2.10 – Насыщение зоны контакта колеса с рельсом при двух катушках.

На рисунке 2.11 показана концентрация магнитного поля для случаев отдельного (а, б) и совместного (в) использования катушек [137].



а – продольное расположение катушки 140 витков;

б – поперечное расположение катушки 200 витков; в – две катушки

Рисунок 2.11 – Концентрация магнитного поля при токе 5 А.

Графические зависимости магнитных величин в зоне контакта колеса и рельса при изменении тока катушек от 0 до 5 А имеют нелинейный характер, рисунок 2.12. Утолщённые графики соответствуют бандажной стали, тонкие – Ст3. Для первой катушки 140 витков (индекс 1) – штрихпунктирная линия, для второй катушки 200 витков (индекс 2) – штриховая линия, для двух катушек (индекс 12) – сплошная линия [137].

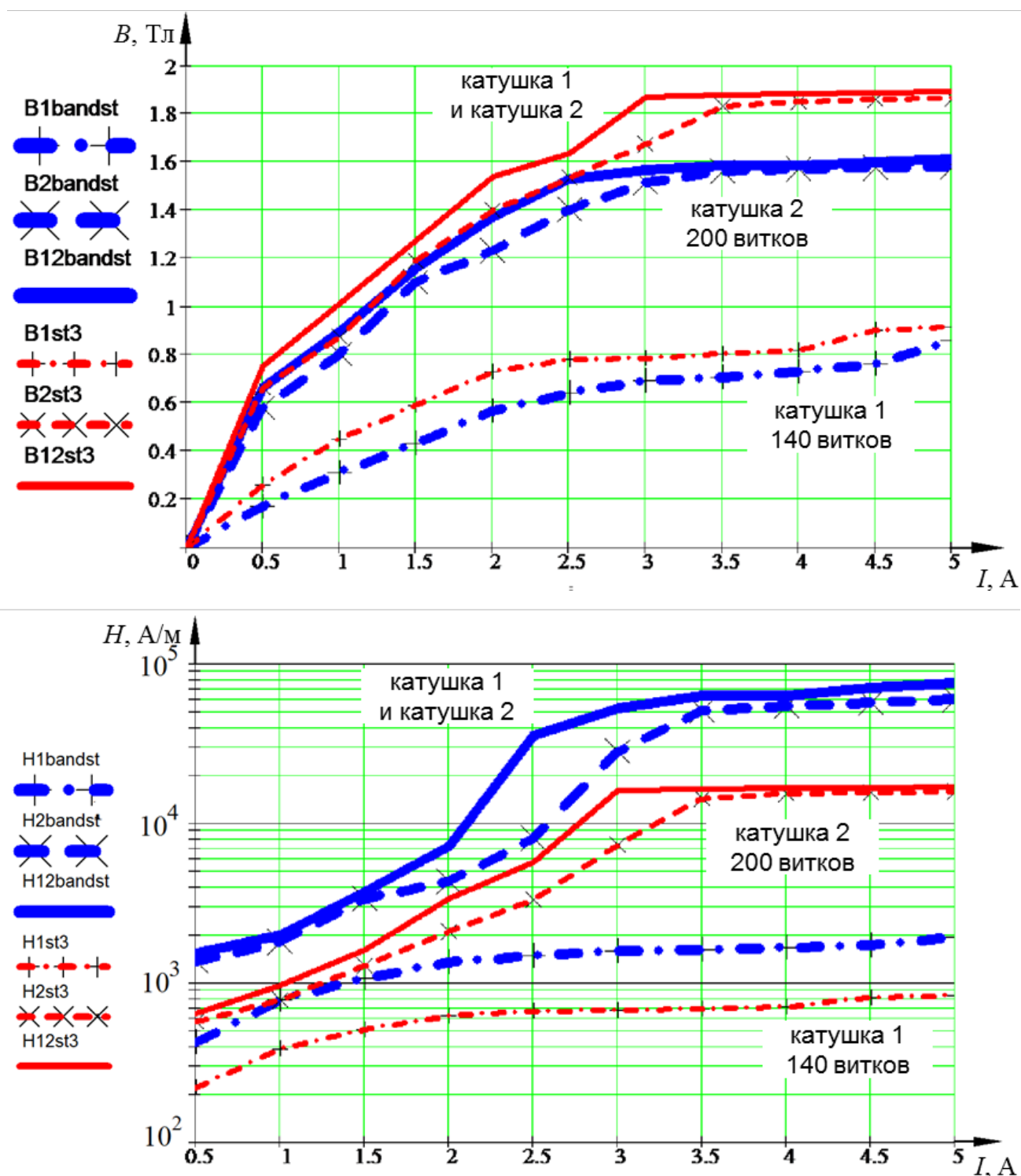


Рисунок 2.12 – Зависимость индукции и напряжённости магнитного поля от тока

Материал Ст3, по сравнению с бандажной сталью, обладает меньшим магнитным сопротивлением. Магнитная проницаемость материала Ст3 выше магнитной проницаемости бандажной стали, при этом, напряжённость бандажной стали выше на всём интервале намагничивания. До насыщения магнитная проницаемость Ст3 выше магнитной проницаемости бандажной стали в 2-3 раза, после насыщения разница снижается до 15 %. Насыщение материала Ст3 наступает при индукции величиной 1,5 Тл, бандажной стали – 1,3 Тл [90].

Управляющим воздействием на процесс трения является магнитное поле, в зоне трения оно характеризуется рядом параметров. Исследование нескольких ферромагнитных материалов позволяет выделить те параметры магнитного поля, которые наиболее коррелируют с трибологическими характеристиками.

2.3 Исследование молекулярной составляющей коэффициента трения

Основной закон трения был выявлен Леонардо да Винчи в виде зависимости силы трения F от нагрузки N , через 200 лет точную формулировку дал Гийом Амонтон [24, с. 319]. Коэффициент трения μ показывает величину пропорциональности силы трения и нагрузки: $F = \mu N$. Кулон ввёл слагаемое A , характеризующее адгезионное схватывание поверхностей, в расширенной форме закон получил название Амонтона – Кулона.

$$F = A + \mu N. \quad (2.6)$$

В деформационной и молекулярной теориях трения наиболее известны представления о трении Ф.П. Боудена, Б.В. Дерягина, И.В. Крагельского [14-16, 20, 24, 29]. В деформационной теории Ф.П. Боуден силу трения раскладывает на два слагаемых: сопротивление срезу металлических соединений и сопротивление пластическому вытеснению менее твёрдого металла.

$$F = \theta_{\text{пр}} S_{\text{ф}} + \tau S, \quad (2.7)$$

где $\theta_{\text{пр}}$ – касательное напряжение среза; $S_{\text{ф}}$ – фактическая площадь контакта; τ – предел текучести (удельное сопротивление вытеснения); S – поперечное сечение дорожки трения.

Исследователи W.B. Hardy, P. Woog, Я.И. Френкель, Т.А. Конторова и др. высказывали идею дискретности поверхностей трения [34, 150-152], Б.В. Дерягин развил молекулярную теорию трения, которая приводит к двучленному закону трения [20].

$$F = \mu_1 S(p_0 + p), \quad (2.8)$$

где μ_1 – коэффициент трения по Дерягину; S – площадь истинного контакта; p_0 – удельная сила молекулярного взаимодействия; p – удельное давление от нагрузки N .

Экспериментальные и теоритические исследования износа и трения, проводимые в лаборатории И.В. Крагельского, объединяют адгезионные и деформационные процессы в молекулярно-механическую теорию трения [15, 16]. Силу трения И.В. Крагельский представляет в виде суммы механической $\tau_{\text{мех}}$ и молекулярной $\tau_{\text{мол}}$ составляющих [14].

$$F = \tau_{\text{мех}} + \tau_{\text{мол}} = \frac{nA_1 + A_2}{n+1} S_{\phi} + \frac{nB_1 + B_2}{n+1} N, \quad (2.9)$$

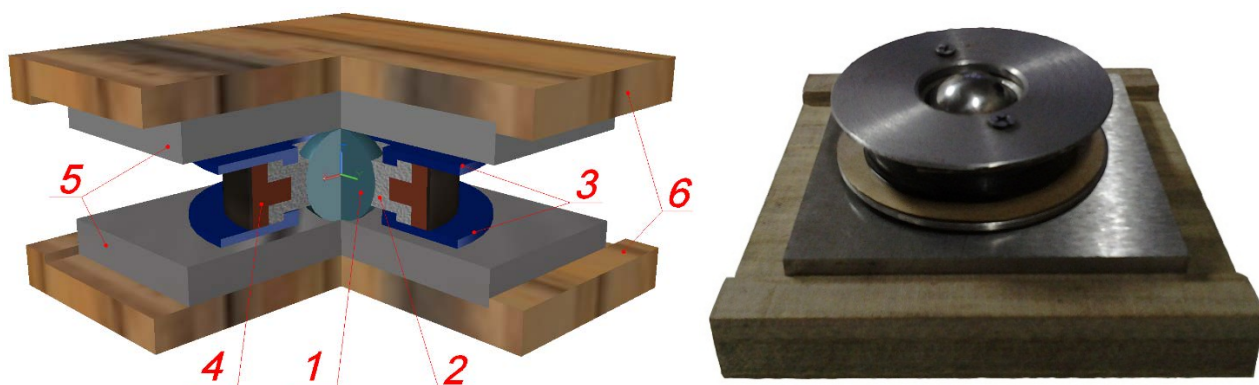
где A_1 – напряжение среза; A_2 – удельное давление молекулярного взаимодействия; n – константа; B_1 – коэффициент роста сопротивления срезу в зависимости от давления; B_2 – коэффициент молекулярной шероховатости.

Коэффициент трения μ складывается из механической $\alpha S_{\phi}/N$ и молекулярной β компонент, включающих эмпирические коэффициенты $\alpha = \frac{nA_1 + A_2}{n+1}$, $\beta = \frac{nB_1 + B_2}{n+1}$.

$$\mu = \frac{\alpha S_{\phi}}{N} + \beta. \quad (2.10)$$

Таким образом, коэффициент трения является функцией площади контакта и давления, а также зависит от молекулярной адгезии поверхностей. Шариковые трибометры позволяют измерить коэффициент трения. Для гладких поверхностей шара и плоскости площадь контакта мала, механическая составляющая коэффициента трения принимает незначительную величину $\alpha S_{\phi}/N \rightarrow 0$, преобладает молекулярная составляющая $\beta \approx \mu$.

Экспериментальные исследования молекулярной составляющей коэффициента трения проводились в лаборатории кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета. Исследования подтверждаются актом внедрения, который приведён в приложении Б. Молекулярная составляющая коэффициента трения определялась при помощи одношарикового инденторного устройства и установки, изображённых на рисунках 2.13 и 2.14.



1 – шар; 2 – корпус; 3 – обойма; 4 – обмотка электромагнита; 5 – образец;
6 – текстолитовый держатель.

Рисунок 2.13 – Одношариковое инденторное устройство

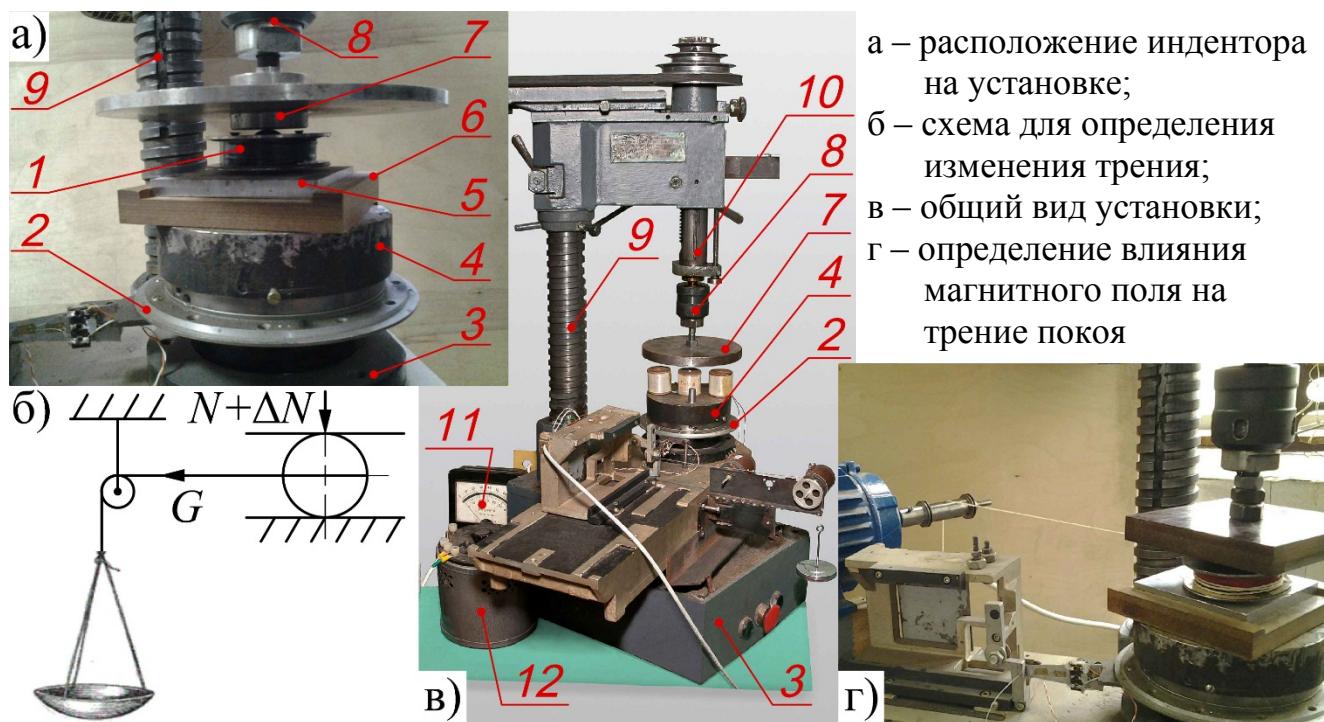


Рисунок 2.14 – Установка для исследования молекулярной составляющей коэффициента трения

Одношариковое инденторное устройство (рисунок 2.13) является активным, содержит создающую МДС обмотку 4, обмотка выполнена из 112 витков медного провода диаметром 1,2 мм. Полированный стальной шар 1 впрессован в алюминиевый корпус 2. Верхняя и нижняя стальные дисковые обоймы 3 накрывают корпус, образуя паз для обмотки. Шар зажимается между нижним и верхним образцами 5, в процессе работы воздушный зазор между обоймой и образцами составляет от 2 до 3 мм. Плоские образцы прямоугольного сечения 100×100 мм толщиной 10 мм обоймы и шар диаметром 25 мм изготовлены из бандажной стали. Верхний и нижний образцы размещаются в текстолитовых держателях 6, которые обеспечивают магнитную изоляцию [138].

Для оценки молекулярной составляющей коэффициента трения при воздействии постоянного магнитного поля использовалась изготовленная на основе сверлильного станка установка, оснащённая инденторным устройством, рисунок 2.14 а. На станине 3 установлена тензометрическая поворотная опора 2 с диском 4, текстолитовым держателем 6 и образцом 5. На образце установлено 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 10, рисунок 2.14 в. Ток обмотки инденторного устройства задаёт ЛАТР 12, его величина контролируется амперметром 11.

Шар индентора зажимается между плоскими образцами силой N , образуя высшую кинематическую пару первого класса, рисунок 2.14 б. Через точки контакта шара с нижней и верхней плоскостями проходит вертикальная ось вращения. К индентору в горизонтальном направлении приложена сила G . Вектор силы удалён от вертикальной оси шара, что создаёт условия для его верчения. Сила индентору сообщается через нерастяжимую нить, один конец которой намотан поверх обмотки, а второй перекинут через неподвижный блок, рисунок 2.14 г. Натяжение нити осуществляется при помощи аптечных гирь весом G . Для исключения значительного перекоса индентора центр шара и верх блока расположены на одном уровне.

Выполнены серии экспериментов при различных режимах намагничивания, каждая серия включала пять опытов с изменением тока катушки от 0 до 2 А, прижатие шара индентора оставалось постоянным $N=50$ Н. Основная задача экспериментов заключалась в сборе данных величины намагничивающего тока I и силы натяжения нити G в момент поворота индентора. Эксперименты проводились в следующей последовательности: подготовка установки к эксперименту, подключение индентора к источнику напряжения и установка требуемого значения силы тока в обмотке, постепенное увеличение силы натяжения нити, снятие нагрузки с нити после приведения индентора в движение, подсчёт веса груза. Этап подготовки включал поверку гирь класса точности М1, предназначенных для технических анализов, очистку поверхностей трения, проверку работоспособности средств измерения, установку индентора, наматывание нити, прикрепление к шпинделю груза, осмотр электрических цепей.

Исследуемая магнитная цепь решается в симметричной постановке. Наличие повторяющихся областей даёт возможность воспользоваться методом конечных суперэлементов, позволяющим сократить объём вычислений с сохранением точности [153]. Расчётная магнитная цепь разбивается на суперэлементы (подобласти). Решение сосредотачивается внутри суперэлемента, который описывается системой базисных функций и граничными условиями. В качестве суперэлемента принята четверть инденторного устройства (рисунок 2.15), плоскости симметрии ZY и XU ограничивают расчётную область. Магнитный поток суперэлемента увязывается с потоками всего устройства. На рисунке 2.16 приведены зависимости параметров магнитного поля в зоне контакта шара индентора и образца от намагничивающего тока катушки. Использование 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. Начальное насыщение зоны трения наступает при индукции величиной 1,3 Тл, МДС катушки в момент насыщения составляет 90 А-витков [138].

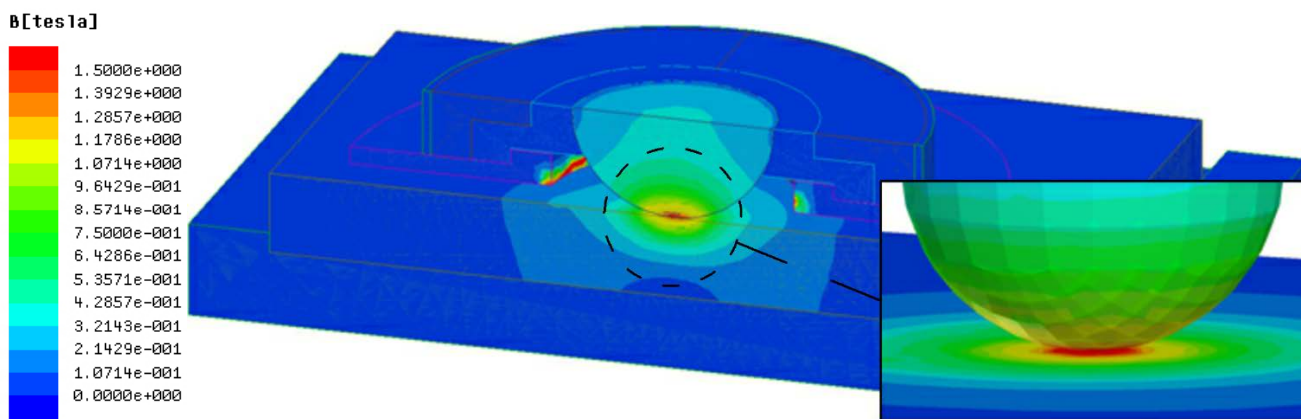


Рисунок 2.15 – Концентрация магнитного поля в суперэлементе устройства

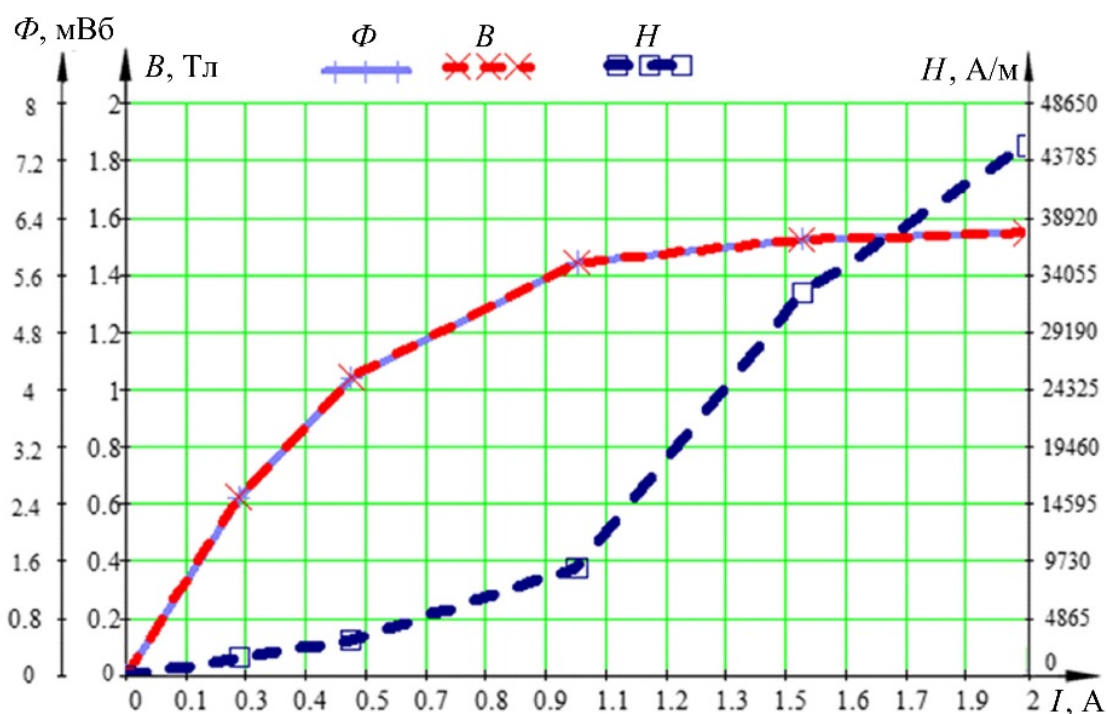


Рисунок 2.16 – Зависимость параметров магнитного поля в зоне контакта шара индентора с плоскостью от силы тока

Опыты показывают, что при отсутствии намагничивающего тока ($I=0$ А) индентор приводится в движение после приложения к нити силы $G=7,9$ Н. Намагничивание зон 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 на величину ΔF .

Сосредоточенная в воздушном зазоре магнитная энергия создаёт в зоне контакта шара с плоскостью силу электромагнитного притяжения $\Delta N = 0,5BHs$,

которая зависит от индукции B , напряжённости H магнитного поля и площади s [139]. Поскольку площадь контакта 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 (2.1) упростится $\Delta F = \Delta \mu \cdot N$. При $N = \text{const}$ весь прирост силы трения ΔF обусловлен увеличением коэффициента трения за счёт молекулярной составляющей $\Delta \beta \approx \Delta \mu$, рисунок 2.17.

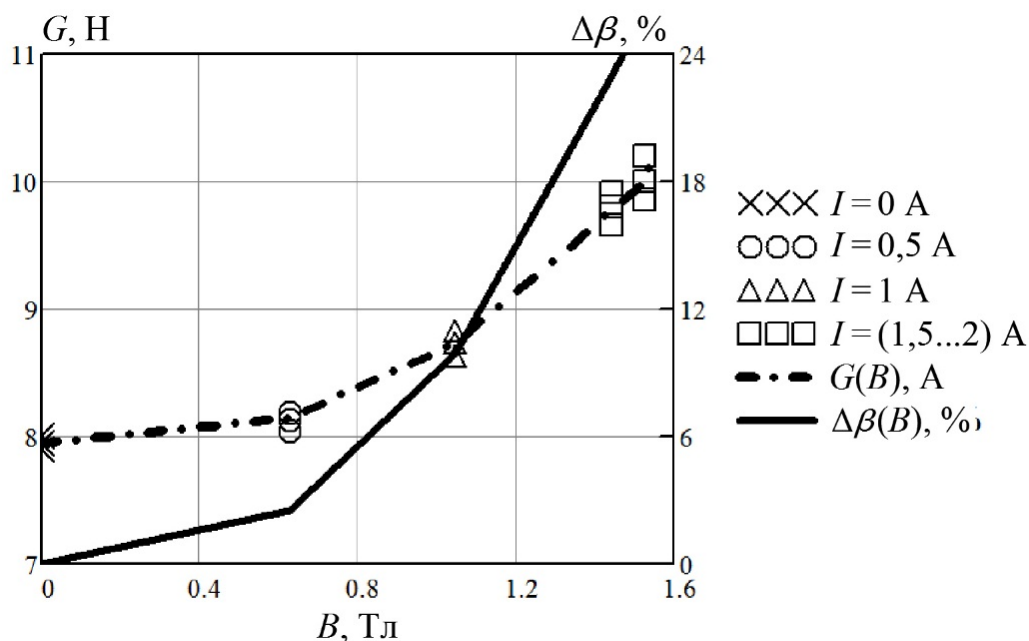


Рисунок 2.17 – Изменение силы натяжения нити и молекулярной составляющей коэффициента трения от индукции магнитного поля в зоне контакта

Таким образом, одношариковое инденторное устройство позволяет исследовать изменение коэффициента трения между стальными образцами при воздействии на зоны контакта магнитного поля. При начальном насыщении зоны контакта шара индентора с плоскостью молекулярная составляющая коэффициента трения увеличивается на величину от 15 до 19 %, при полном насыщении – от 20 до 25 %.

Для оценки общей точности определения величины регистрируемой силы принимается предельное значение погрешности ε , состоящее из случайных систематических погрешностей: от растяжения нити – 1 %, от неучтённых сил трения – 1 %; от соединительных проводов – 1 %, от неточности укладки гирь и подбора их массы – 3 %; $\varepsilon = \sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2 + 3^2} = 3,46 \%$.

2.4 Выводы по разделу 2

1. Изготовленные трибометрические установки позволяют провести серию экспериментов 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 %.
2. Одношариковое инденторное устройство позволяет исследовать молекулярную составляющую коэффициента трения между стальными образцами при воздействии на зоны контакта магнитного поля. В режиме начального насыщения зоны контакта молекулярная составляющая коэффициента трения повышается от 15 до 19 %, при полном насыщении – от 20 до 25 %.
3. Взаимодействие цилиндрической поверхности с плоскостью и точечный контакт шара с плоскостью позволяют воссоздать на установках процессы, схожие с процессами системы колесо – рельс, при воздействии постоянного магнитного поля. Для применения полученных результатов к системе колесо – рельс следует учитывать геометрические особенности зоны контакта.

3 НАМАГНИЧИВАНИЕ ЗОНЫ КОНТАКТА КОЛЕСА С РЕЛЬСОМ

В данном разделе рассматривается участок магнитной цепи, включающий бандаж колёсной пары, головку рельса и воздушный зазор между ними. Получены параметры магнитного поля и магнитного сопротивления 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. Описание остальных участков магнитной цепи и расположение источника намагничивающей силы дано в разделе 5.

3.1 Особенности моделирования магнитного поля между колесом и рельсом

В пропускании магнитного потока между колесом и рельсом участвуют рабочие и смежные с ними поверхности, силовые линии магнитного поля проходят через контактное пятно и воздушный зазор. Величина магнитного сопротивления зоны контакта колеса с рельсом обуславливается геометрическими и магнитными условиями. Данные условия варьируются за счёт ряда эксплуатационных особенностей.

Из-за перемещения ферромагнитных тел и изменения размеров воздушного зазора возникает геометрическое воздействие. На сопротивление стали сильно влияет 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.

Для дальнейшего определения потоков выделим характерные поверхности на колесе и рельсе, в таблице 3.1 приведены условия распределения магнитного потока между этими поверхностями [128].

Таблица 3.1 – 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 на головке рельса полки износа, всползание гребня [43]	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

Колесо с рельсом контактируют преимущественно поверхностями катания, поэтому большая часть магнитного потока протекает через верх головки рельса. 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 [128].

Контактирование верха головки рельса с гребнем и областью фаски колеса возникает в предельных условиях эксплуатации: одноточечный гребневый контакт изношенного колеса, разуклонка и отжатие рельса, образование на головке рельса полки износа, вкатывания гребня на головку рельса. Указанные режимы сопровождаются отрывом поверхности катания колеса от головки рельса [43, 154, 155], что

способствует переориентации значительной части магнитного потока с поверхности катания на смежные поверхности. Потеря устойчивости колёс характерна для порожних и малозагруженных вагонов, при высоких скоростях [156]. За счёт значительной осевой нагрузки локомотивы обладают запасом устойчивости колеса от вкатывания гребня на головку рельса [157].

Поскольку между колесом и рельсом поддерживается постоянный ферромагнитный контакт, то можно принять, что весь магнитный поток складывается из потоков, проходящих через поверхность катания и гребень колеса, а потоки рассеяния незначительны. Из-за большого воздушного зазора поток через внешнюю грань колеса можно отнести к потокам рассеяния, внутренние поверхности колёс так же мало задействованы в пропускании магнитного потока [128].

В тяжелых условиях эксплуатации, при скольжении локомотивного колеса температура в контакте колеса с рельсом составляет от 400 до 600 °С, а максимальные значения достигают 680 °С [3, 6]. Температурная вспышка приходится на подповерхностный слой выступов [12]. Указанные условия могут способствовать изменению магнитной восприимчивости приконтактных областей, когда температура близка к точке Кюри. Так для железа температура Кюри составляет 770 °С, а для различных марок рельсовой стали находится в пределах от 630 до 790 °С [158]. Поскольку средние эксплуатационные температуры ниже точки Кюри, то существенного снижения магнитной восприимчивости и проявления парамагнитных свойств в зоне контакта не происходит. Толщина газожидкостного дисперсного слоя между колесом и рельсом незначительна (до 35 мкм [6]). Исходя из сказанного, в эксплуатации контактное пятно проявляет преимущественно ферромагнитные свойства. При расчёте непостоянство свойств учитывается послойным разбиением приконтактной области и заданием переменных характеристик [128].

Поверхности колеса и рельса характеризуются сложной геометрией и нелинейностью магнитных свойств. Методы решения с использованием теории цепей имеют ряд допущений и не обеспечивают высокой точности [143]. Аналитическое решение малоприспособно для практических задач. Применение упрощенных математических моделей может ограничиваться предпроектными расчётами. Полевые

методы расчёта магнитных систем основаны на решении дифференциальных уравнений Максвелла. В данной работе для анализа магнитного поля применён численный метод с использованием программного продукта Ansys [128, 142, 144].

Сложная геометрия и нелинейность свойств выражается в особенностях расчёта рассматриваемого участка магнитной цепи. Первая особенность заключается в том, что значительное магнитное сопротивление воздушного зазора располагается в непосредственной близости от пятна контакта. В основном энергия магнитного поля сосредотачивается в воздухе, там же накапливается и погрешность расчёта. Вторая особенность заключается в незначительных размерах контакта ферромагнитных тел и клиновидной форме воздушного зазора. Всё это создают предпосылки для искажения расчётных значений и появления всплесков градиента поля вблизи воздушного зазора из-за сингулярности.

Для минимизации погрешности параметры магнитного поля определяются не на границе сред, а в приповерхностном слое колеса и рельса. Местное увеличение кучности сетки также способствует снижению ошибки. Повышение количества итераций приводит к усовершенствованию сеточной модели. С каждым новым проходом сеточный генератор адаптирует модель до тех пор, пока энергетический баланс будет соответствовать критерию точности [128].

3.2 Формирование области насыщения в зоне контакта колеса с рельсом

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 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 : $U_M = \int_l \vec{H} d\vec{l}$, $\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}$. Приняв, что поле однородное, а

поверхность плоская, величина магнитного потока определится скалярным произведением вектора магнитной индукции на вектор площади $\Phi = \vec{B}\vec{S}$. Магнитная проницаемость μ определяется соотношением индукции и напряжённости поля $[\mu] = \frac{\partial \vec{B}}{\partial H}$ и характеризует распределение магнитного сопротивления [128].

Наиболее намагниченным поверхностям колеса и рельса соответствуют ветви протекания основной части магнитного потока. Минимальное число ветвей меняется в зависимости от положения колеса относительно рельса. При наличии зазора между гребнем колеса и рельсом 98 % магнитного потока протекает через поверхность катания. При двухточечном гребневом контакте от 30 до 40 % магнитного потока переориентируется на поверхности гребня и выкружу.

Упрощённую схему замещения магнитной цепи между колесом и рельсом можно представить одной или двумя ветвями. Детализация ветви, содержащей контакт колеса с рельсом, приводит к параллельному соединению контактного пятна и воздушного зазора. Через пятно контакта колеса с рельсом проходит от 7 до 17 % магнитного потока поверхности катания. При насыщении стали в области контактного пятна концентрируется энергия до 0,03 Дж, намагничивающий поток, пронизывающий пятно контакта, составляет от 0,1 до 0,8 мВб. Наличие в зоне контакта колеса с рельсом воздушного зазора способствует спрямлению веббер-амперной характеристики, рисунок 3.1.

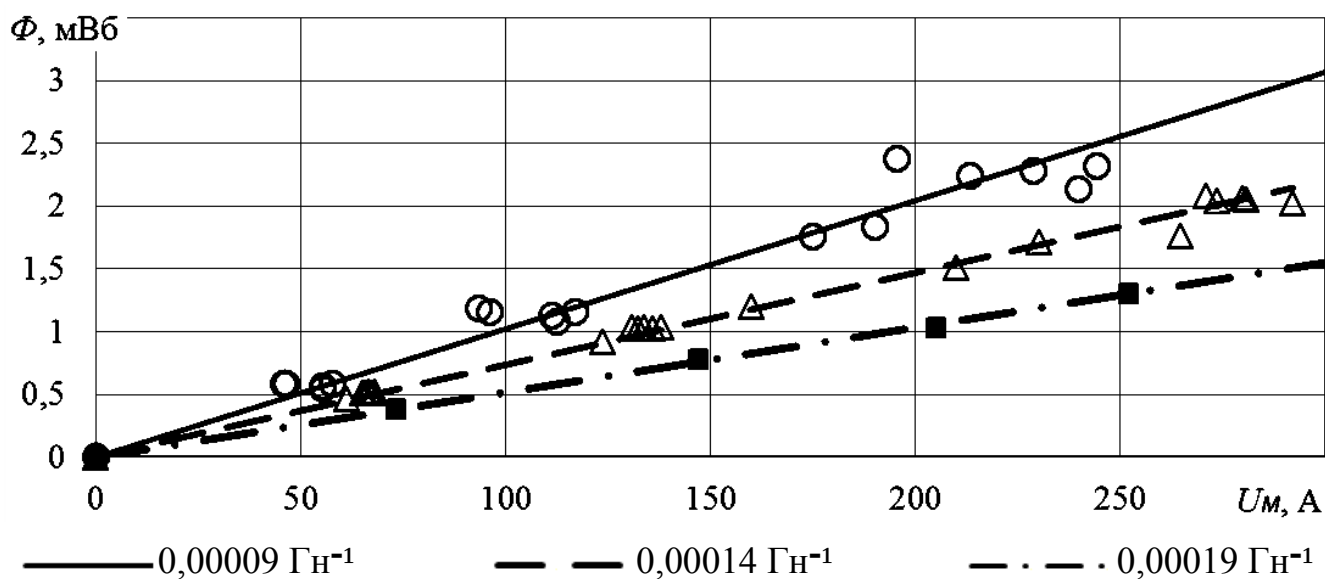


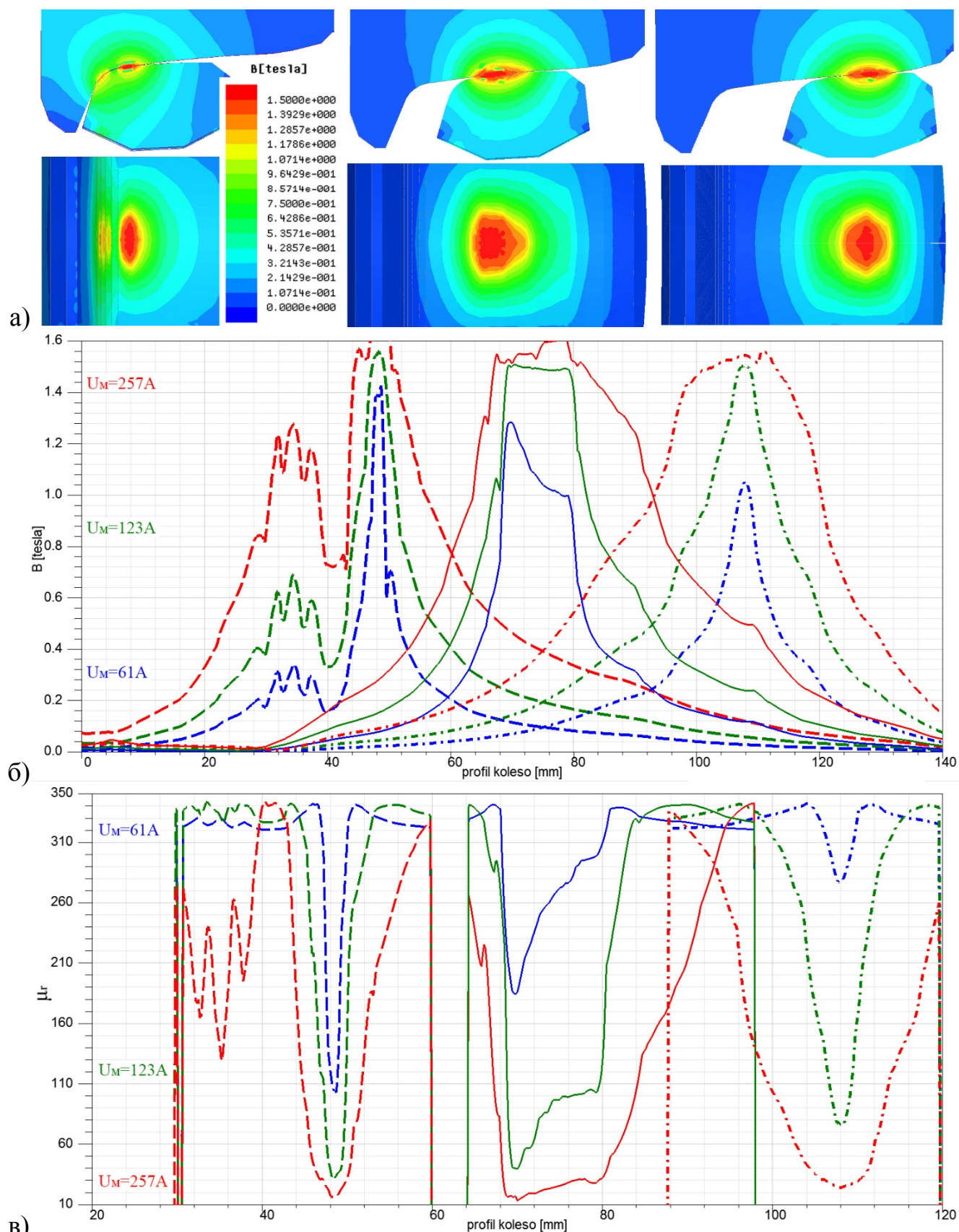
Рисунок 3.1 – Веббер-амперная характеристика зоны контакта колеса с рельсом

Три режима намагничивания позволяли достичь ненасыщенное, насыщенное состояние и полное насыщение зоны контакта. 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. Изучено влияние режима намагничивания, изменение положения колеса относительно рельса, наличие и отсутствие износа поверхностей на распределение и параметры магнитного поля в зоне контакта. Расчёты выполнены для трёх характерных положений колеса относительно рельса: двухточечный гребневый контакт, центральное положение и положение с наибольшим зазором между гребнем и рельсом [128].

В 50 % рассмотренных контактов магнитное сопротивление зоны контакта колеса с рельсом составляет от 0,00013 до 0,00015 Гн⁻¹: при взаимодействии изношенного колеса и нового рельса, при центральном положении нового колеса относительно изношенного рельса, а также при наличии зазора между гребнем нового колеса и нового рельса. В 42 % – сопротивление находится в пределах от 0,00008 до 0,0001 Гн⁻¹: при контакте изношенных профилей, при двухточечном гребневом контакте нового колеса с новым или изношенным рельсом. Наибольшее магнитное сопротивление 0,00019 Гн⁻¹ наблюдается у 8 % контактов – при значительном воздушном зазоре между гребнем колеса и рельсом с новыми профилями.

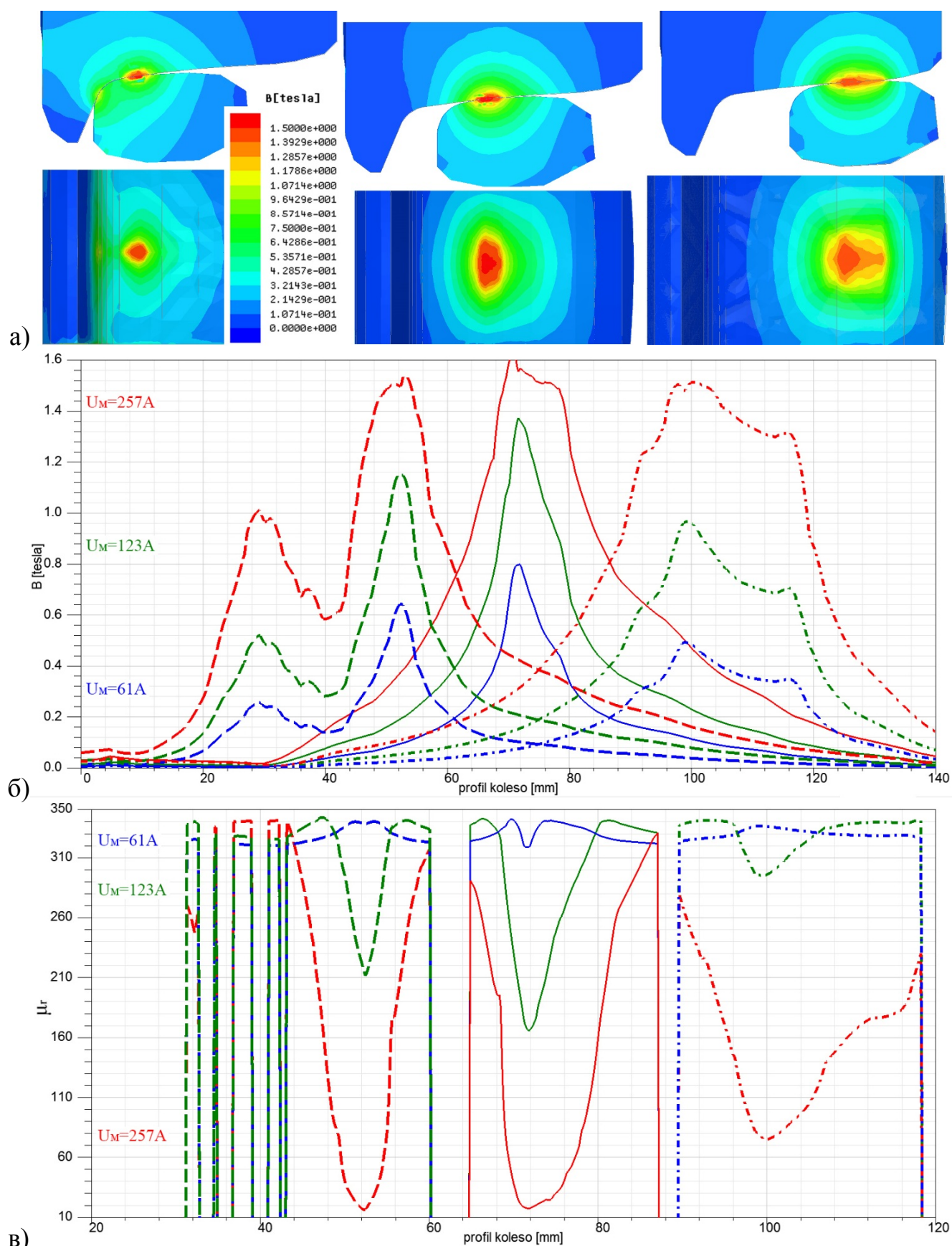
Если не учитывать положение колеса относительно рельса и особенности износа профилей, то средневзвешенное магнитное сопротивление зоны контакта колеса с рельсом можно принять 0,00012 Гн⁻¹. При последовательном пропускании потока через левое и правое колёса сопротивления складываются, для зон контакта колёсной пары с рельсами магнитное сопротивление составит 0,00024 Гн⁻¹.

Концентрация магнитного поля в зоне контакта колеса с рельсом и на поверхности колеса показана на рисунках 3.2-3.5. Ниже приведены графики изменения магнитной индукции на поверхности колеса и относительной магнитной проницаемости в зазоре между колесом и рельсом. На графиках горизонтальная ось соответствует изменению расстояния вдоль профиля колеса. За начало отсчёта принята нижняя точка гребня колеса.

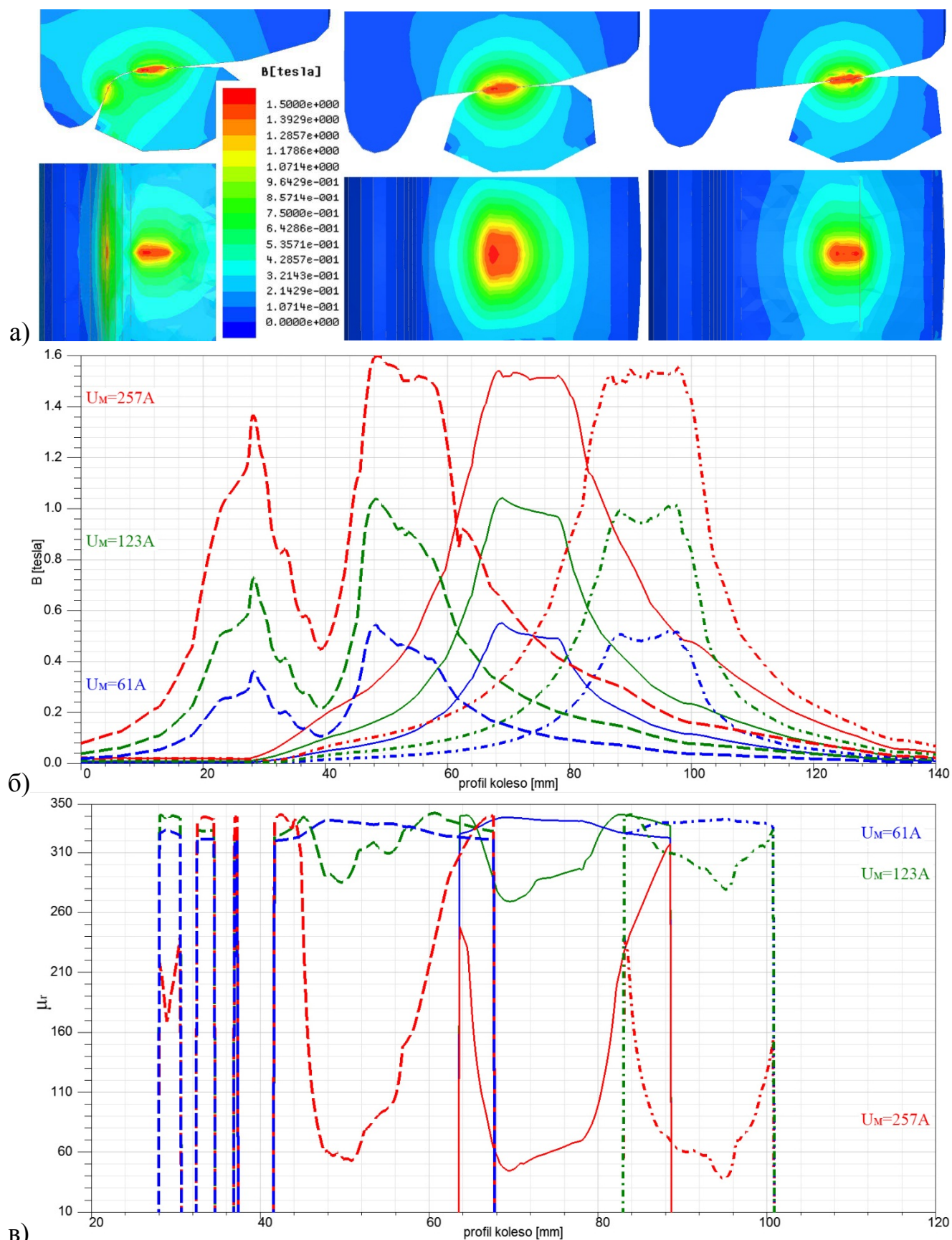


а – распределение магнитного поля при $U_M=257$ А; б – магнитная индукция на поверхности колеса; в – относительная магнитная проницаемость зазора
 — — двухточечный гребневый контакт; — центральное положение колеса;
 — . — . наибольший зазор между гребнем и рельсом

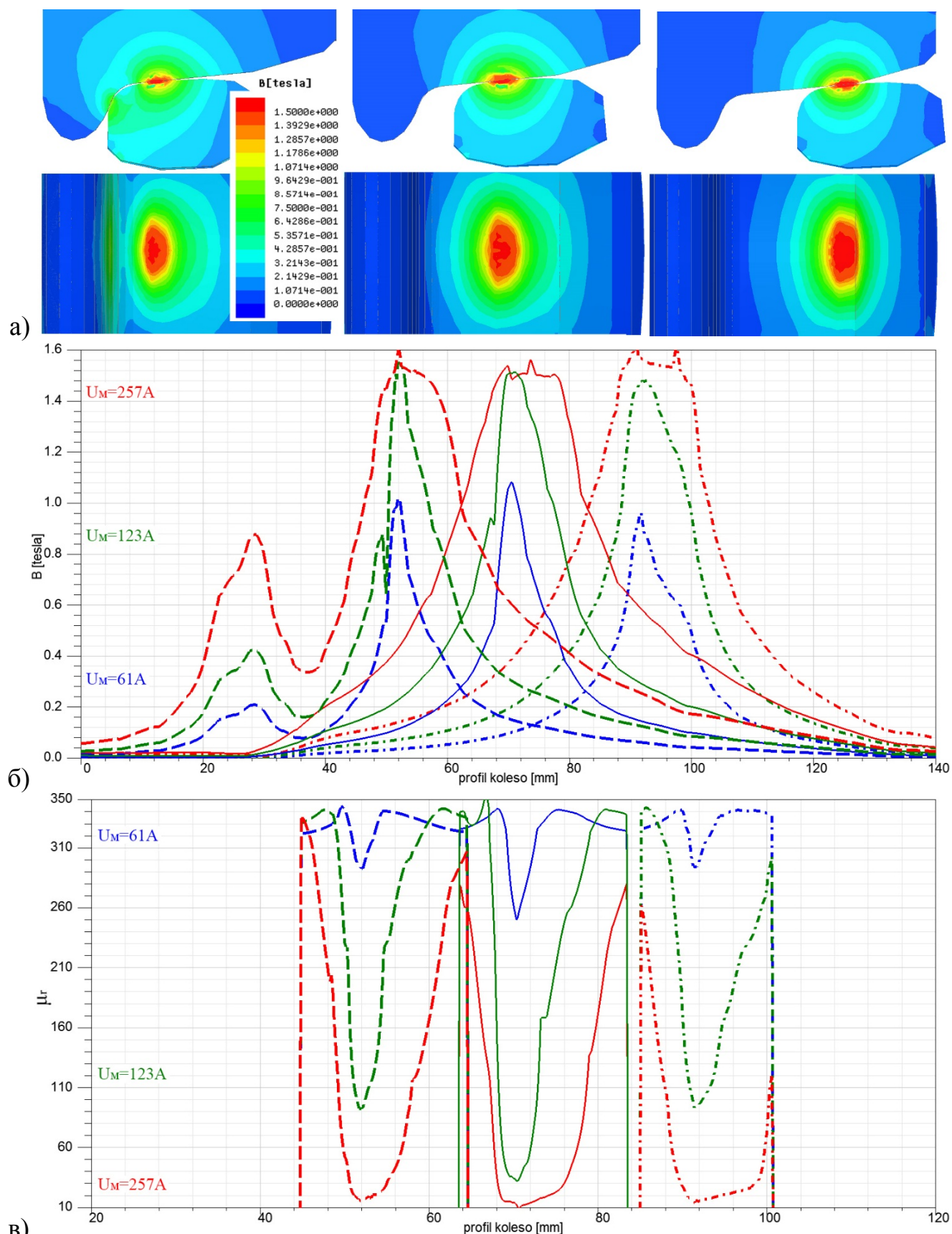
Рисунок 3.2 – Изношенное колесо, изношенный рельс



а – распределение магнитного поля при $U_M=257$ А; б – магнитная индукция на поверхности колеса; в – относительная магнитная проницаемость зазора
 — — двухточечный гребневый контакт; — — центральное положение колеса;
 — . — . наибольший зазор между гребнем и рельсом
 Рисунок 3.3 – Изношенное колесо, новый рельс



а – распределение магнитного поля при $U_M=257$ А; б – магнитная индукция на поверхности колеса; в – относительная магнитная проницаемость зазора
 — — двухточечный гребневый контакт; — — центральное положение колеса;
 — . — . наибольший зазор между гребнем и рельсом
 Рисунок 3.4 – Новое колесо, изношенный рельс



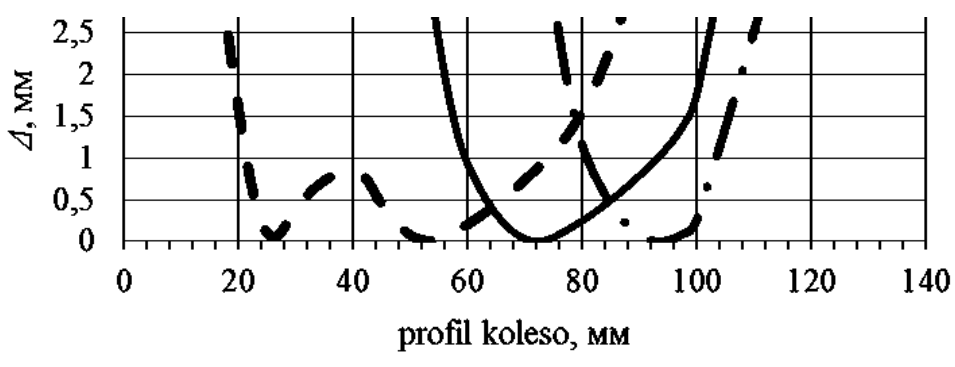
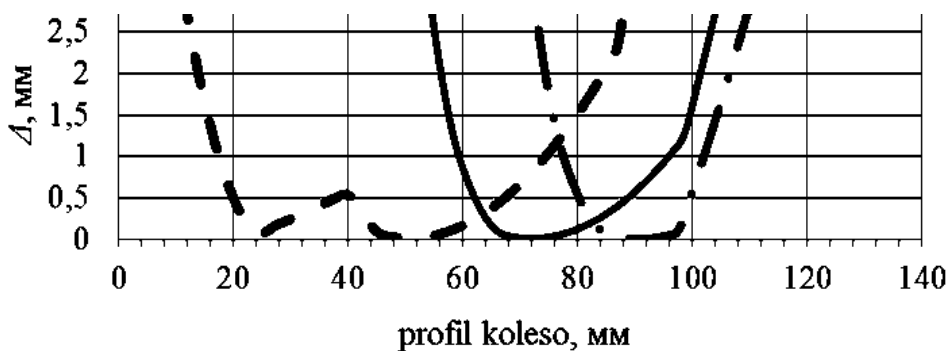
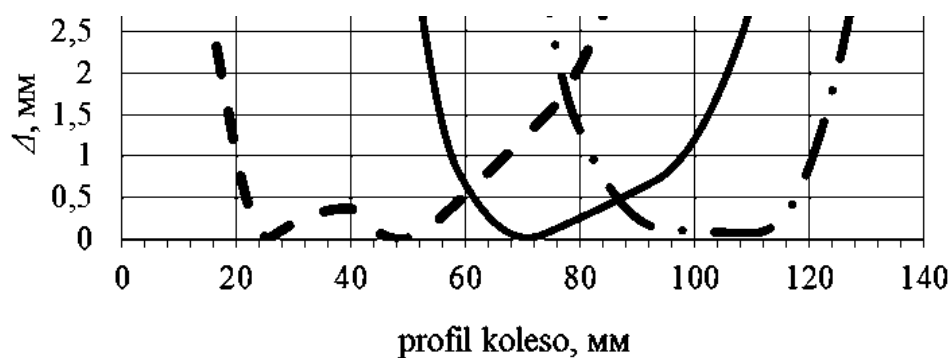
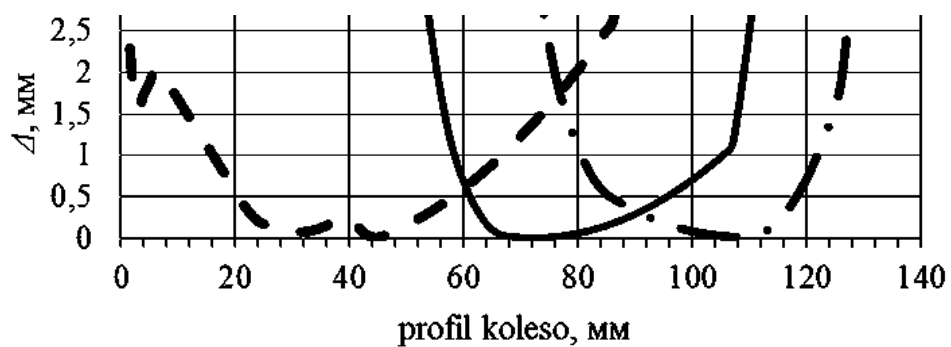
а – распределение магнитного поля при $U_M=257$ А; б – магнитная индукция на поверхности колеса; в – относительная магнитная проницаемость зазора
 — — двухточечный гребневый контакт; ——— центральное положение колеса;
 — . — . наибольший зазор между гребнем и рельсом
 Рисунок 3.5 – Новое колесо, новый рельс

Исследования трения И.В. Крагельского и Н.Б. Демкина показывают, что коэффициент трения сильно зависит от фактической площади контакта, а площадки фактического контакта распределены в пределах контурного контакта [16, 18].

Чтобы эффект влияния магнитного поля на стальные пары трения применить в трибосистеме колесо – рельс, следует подвергнуть намагничиванию микровыступы единичных площадок фактического контакта. Поскольку магнитная восприимчивость у ферромагнитных и парамагнитных веществ одного знака, то в зоне контакта не удаётся достичь избирательного намагничивания. Вместе с микровыступами фактического контакта намагничиваются области контурного контакта, а при достаточном магнитном напряжении насыщается и номинальный контакт колеса с рельсом.

Границы области насыщения принимают близкую к эллиптической форму, рисунки 3.2-3.5. Большая полуось области насыщения между колесом и рельсом 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. Очертание области насыщения связано с распределением силовых линий магнитного поля в колесе и рельсе, а также с изменением магнитного сопротивления. Анализ изменения магнитной проницаемости показывает, что сопротивление увеличивается при удалении от пятна контакта колеса с рельсом. Если учесть, что в основном магнитное сопротивление обусловлено воздушным зазором, то зазор оказывает значительное влияние и на формирование области насыщения [128].

Рассмотрим изменение зазора между колесом и рельсом Δ во взаимно перпендикулярных продольном и поперечном сечениях. 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. Зазор в поперечном сечении зависит от износа колеса и рельса, а также поперечного положения колёсной пары в колее, рисунок 3.6.



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 3.6 – Зазор между колесом и рельсом в поперечном сечении

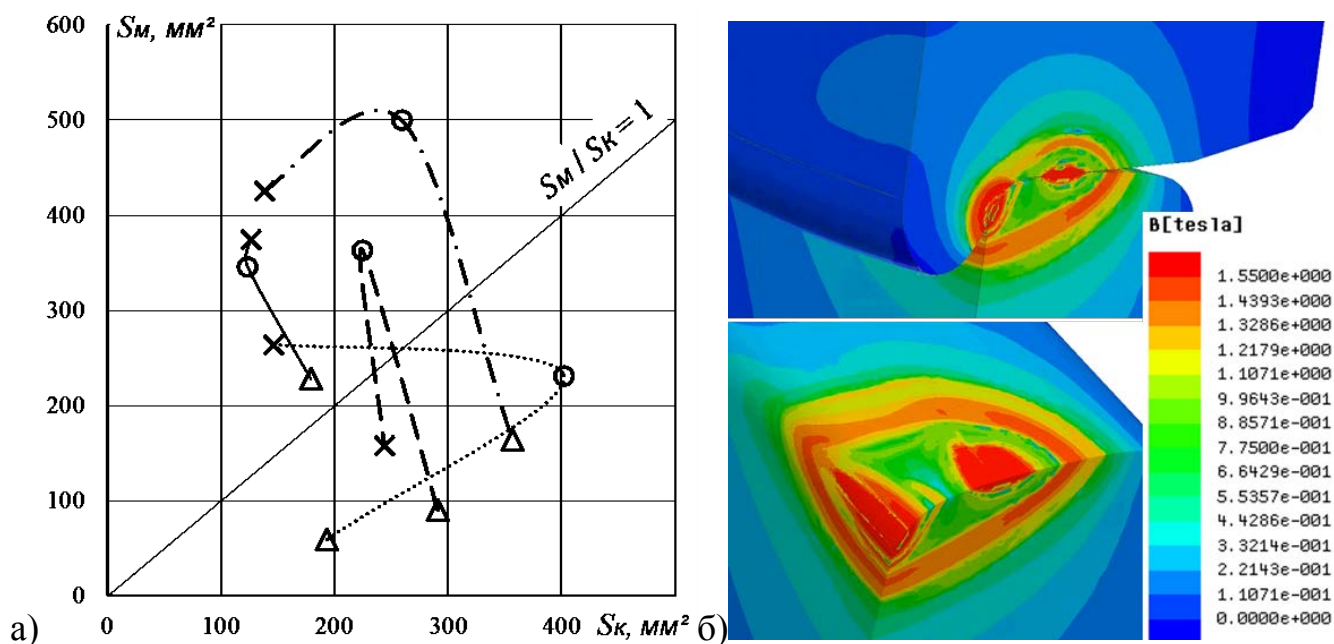
Вращение области магнитного насыщения объясняется тем, что воздушный зазор вокруг контактного пятна изменяется неравномерно. Сопоставление графиков изменения зазора между колесом и рельсом с графиками индукции показывает, что распределение индукции на поверхности колеса имеет обратную зависимость от зазора между телами. Монотонность графиков зазора и индукции меняется в одних и тех же точках профиля, 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 $U_M=257$ А насыщает контакт колеса с рельсом и приконтактную область [128]. Граница области насыщения с индукцией 1,3 Тл располагается в пределах зазора между колесом и рельсом 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.

Далее область насыщения на поверхности катания, где индукция магнитного поля больше индукции начального насыщения, будем называть площадью магнитного контакта колеса с рельсом S_M . Введя понятие коэффициента магнитного перекрытия контакта колеса с рельсом в виде отношения площади магнитного контакта к площади контактного пятна S_K , сможем характеризовать эффективность намагничивания зоны контакта колеса с рельсом.

К неэффективным режимам намагничивания следует отнести случаи, когда площадь магнитного контакта меньше площади контактного пятна ($S_M/S_K < 1$), рисунок 3.7 а. Такие режимы возникают при крайних положениях нового колеса относительно изношенного рельса, при контакте гребня колеса с рельсом, а также при $U_M < 123$ А.

При значительных магнитных напряжениях возникает перенасыщенное состояние зоны контакта колеса с рельсом, появляются дополнительные области насыщения с индукцией более 1,3 Тл. На рисунке 3.7 б показано распределение магнитного поля при $U_M=400$ А.



$\Delta \Delta \Delta$ двухточечный гребневый контакт; $\circ \circ \circ$ центральное положение колеса;

$\times \times \times$ наибольший зазор между гребнем и рельсом;

———— колесо и рельс новые; — — — — — новое колесо и изношенный рельс;

— . — . — колесо и рельс изношены; * * * * * изношенное колесо и новый рельс.

Рисунок 3.7 – Зависимость площади магнитного контакта ($U_M = 257$ А) от площади контактного пятна при различных положениях колеса относительно рельса (а), перенасыщенное состояние зоны контакта колеса с рельсом при $U_M = 400$ А (б)

Результаты расчётов показывают, что насыщение поверхностей колеса и рельса происходит по-разному. Для насыщенного состояния при двухточечном гребневом контакте наибольшее значение индукции магнитного поля на гребне колеса в 1,4-2 раза меньше индукции на поверхности катания. Указанная разница особенно выражена для изношенных колёс и зависит главным образом от площади контактного пятна. При наличии воздушного зазора между гребнем колеса и рельсом через поверхность катания колеса проходит 98 % от всего магнитного потока зоны контакта. При двухточечном гребневом контакте поток поверхности катания уменьшается, его часть составляет от 60 до 70 %, за счёт этого снижается площадь магнитного контакта и коэффициент магнитного перекрытия контакта колеса с рельсом [128].

3.3 Выводы по разделу 3

1. Существенное влияние на распределение магнитного поля между колесом и рельсом оказывает величина воздушного зазора, в меньшей степени – магнитная проницаемость стали. 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.
2. Через пятно контакта колеса с рельсом проходит от 7 до 17 % магнитного потока поверхности катания. Выпучивание магнитного потока в сторону воздушного зазора расширяет область насыщения за пределы контактного пятна, для новых профилей характерна продольная ориентация области насыщения, износ профилей вытягивает область насыщения в поперечном направлении. Вращение области насыщения объясняется неравномерностью воздушного зазора в окрестностях контактного пятна.
3. На параметры магнитного поля в зоне контакта влияют: режим намагничивания, положение колеса относительно рельса, профили поверхностей. Средневзвешенное магнитное сопротивление зоны контакта колеса с рельсом составляет $0,00012 \text{ Гн}^{-1}$. Магнитное напряжение величиной от 123 до 257 А, приложенное к зоне контакта, позволяет поддерживать насыщенное состояние приконтактной области и обеспечивать эффективную величину коэффициента магнитного перекрытия ($S_M/S_K > 1$) для 65 % случаев контактирования колеса с рельсом.

4 ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОФИЛЕЙ КОЛЕСА И РЕЛЬСА

Сила трения между телами зависит от ряда факторов, среди них – величина фактической площади контакта [15]. Известно, что фактическая площадь контакта в 10-20 раз меньше контурной [12]. Передаваемые усилия, микрогеометрия и макрогеометрия колеса и рельса оказывают влияние на величину пятна контакта, на трение и износ особенно на этапе приработки поверхностей [18, 37, 38].

Поскольку поток магнитной индукции через поверхность заданной площади определяется как скалярное произведение вектора индукции на вектор площади, то при изменении размеров поверхности контакта следует учитывать изменение и параметров магнитного поля [123, 129, 131]. Информация о величине мгновенной площади контакта колёс железнодорожного подвижного состава с рельсами позволяет формировать управляющий сигнал для устройств регулирования сцепления, приведённых в разделе 5.

В данном разделе исследовано влияние поперечного положения колёсной пары в рельсовой колее на размеры контактного пятна при наличии и отсутствии износа. В математической форме представлены критерии образования конформного контакта колеса с рельсом.

4.1 Моделирование геометрии контактного пятна в программном комплексе UM Loco

Главная отличительная особенность железнодорожного транспорта заключается в том, что колёса подвижного состава катятся по рельсам. Помимо обычных функций, присущих наземным транспортным средствам: поддержание в вертикальном положении, качение и торможение, железнодорожные колеса выполняют дополнительную функцию – удержание колёсной пары в колее. Контакт между колесом и рельсом является основным источником энергетических потерь в механической части тягового привода локомотива [13, 109-112]. В статьях [126, 129, 131]

взаимодействие колеса с рельсом рассматривается как основополагающий процесс в работе железнодорожного транспорта. Соотношение сил в пятне контакта колеса и рельса оказывают решающее воздействие в вопросах достижения комфорта пассажиров и обеспечения безопасности против схода с рельсов. Устойчивость колеса против вкатывания гребня на головку рельса характеризует соотношение проекций сил на оси системы координат YZ [126, 154, 155, 157, 159]. Уравнения проекций сил на оси для двухточечного и одноточечного гребневого контакта имеют вид:

$$R_y = T_1 \cdot \cos \beta_1 + N_1 \cdot \sin \beta_1 + T_2 \cdot \cos \beta_2 + N_2 \cdot \sin \beta_2, \quad (4.1)$$

$$R_z = N_1 \cdot \cos \beta_1 + T_1 \cdot \sin \beta_1 + N_2 \cdot \cos \beta_2 + T_2 \cdot \sin \beta_2, \quad (4.2)$$

$$R_y = T_1 \cdot \cos \beta_1 + N_1 \cdot \sin \beta_1, \quad (4.3)$$

$$R_z = N_1 \cdot \cos \beta_1 + T_1 \cdot \sin \beta_1, \quad (4.4)$$

где R_y , R_z – равнодействующие реакции; N_1 , N_2 – нормальные составляющие силы в контакте; T_1 , T_2 – тангенциальные составляющие силы в контакте; β_1 , β_2 – угол между нормальной силой и вертикальной осью, рисунок 4.1.

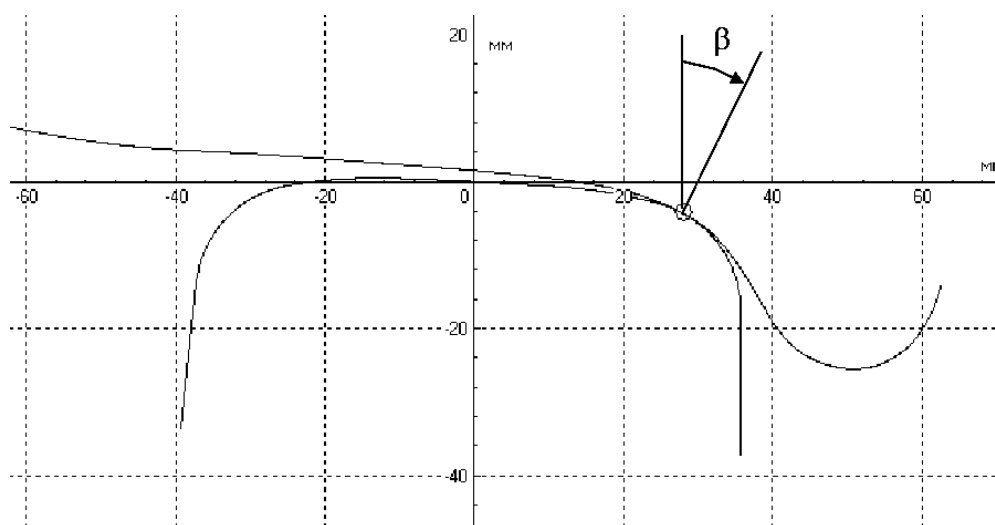


Рисунок 4.1 – Определение угла контакта колеса с рельсом [155]

Характер распределения контактных сил и форма контакта колеса с рельсом зависит от ряда геометрических параметров: степени износа, величины возвышения рельса, его подуклонки, положения колёсной пары в колее. От угла контактирования поверхностей β зависит соотношение проекций сил [155].

Поперечные силы, приложенные в точках контакта колеса и рельса раскладываются на нормальную N и тангенциальную T составляющие [126], рисунок 4.2.

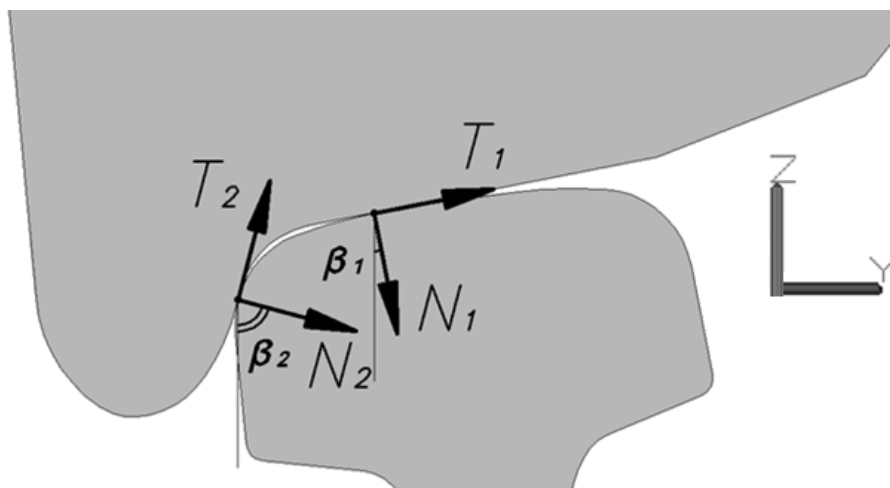


Рисунок 4.2 – Поперечные силы в точках контакта колеса с рельсом [126]

Исследование предельных условий сцепления связано с расчётом в контакте колесо-рельс кинематических характеристик: кривов $\xi_x = v_x/v_0$, $\xi_y = v_y/v_0$, $\xi = \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2}$; спина $\varphi = \omega_n/v_0$ и скорости v_0 . Современные модели касательных сил крива в точках контакта колёс с рельсами основаны на нелинейных зависимостях вида [155].

$$F_x = F_x(N, \xi_x, \xi_y, \varphi, p), \quad F_y = F_y(N, \xi_x, \xi_y, \varphi, p), \quad (4.5)$$

где F_x , F_y – продольная и поперечная силы крива, расположенные в касательной плоскости к точке контакта; N – нормальная реакция в точке контакта; p – набор геометрических параметров, характеризующих профили колеса и рельса в точке контакта (для алгоритма FastSim – кривизны поверхностей).

Компьютерное моделирование при анализе технически сложных процессов широко распространено, примером может служить программный комплекс моделирования динамики систем тел «Универсальный механизм», разработанный в лаборатории «Вычислительной механики» Брянского государственного технического университета [32]. Комплекс решает обширный круг задач, среди них задачи упругого взаимодействия колеса и рельса. К положительным особенностям данного комплекса можно отнести использование быстрых безитерационных и итерационных алгоритмов. Алгоритм FastSim, основанный на теории контакта качения Дж. Калкера и адаптированный для неэллиптических пятен контакта колеса с рельсом, определяет касательные силы [160, 161].

Автор благодарит профессора Погорелова Дмитрия Юрьевича за предоставление программного комплекса «Универсальный механизм» для проведения исследований. Модуль UM Loco содержит богатую элементную базу и библиотеку моделей [30, 33, 155, 162].

Для моделирования выбран шестиосный тепловоз ЧМЭЗ, как самый массовый маневровый локомотив России. Модель тепловоза построена с использованием подхода систем тел, согласно которому механическая система состоит из набора абсолютно твёрдых тел, связанных между собой при помощи силовых элементов и шарниров, рисунок 4.3.

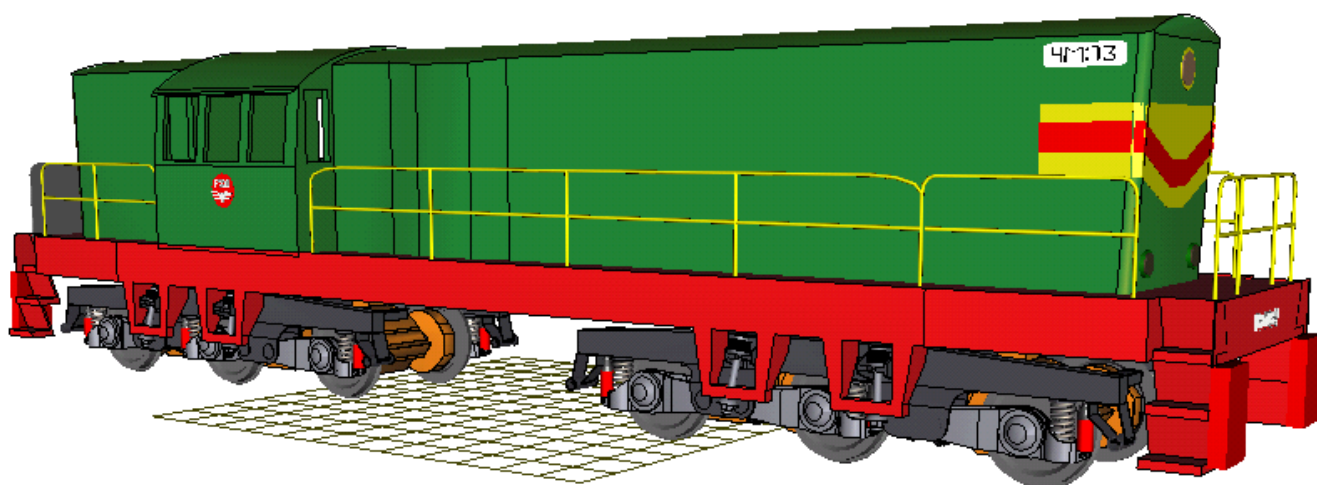


Рисунок 4.3 – Модель тепловоза ЧМЭЗ

Структура модели тепловоза ЧМЭЗ основывается на методе подсистем, который заключается в представлении повторяющихся объектов, рисунок 4.4. Тела экипажной части тепловоза соединены при помощи невесомых упруго-диссипативных связей.

Кузов					
Тележка 1			Тележка 2		
КМБ 1	КМБ 2	КМБ 3	КМБ 4	КМБ 5	КМБ 6
КП 1	КП 2	КП 3	КП 4	КП 5	КП 6

Рисунок 4.4 – Структура подсистем модели тепловоза ЧМЭЗ

При моделировании процесса трогания и разгона задействован алгоритм расчёта сил крипа FastSim. Данный алгоритм основан на линейной теории сил крипа Калкера и является наиболее популярным при использовании в программных комплексах. К преимуществам алгоритма FastSim относятся: сравнительно высокая скорость расчёта, учет спина и простейших геометрических свойств (кривизны контактирующих поверхностей). Алгоритм может быть использован и при биконтакте для расчёта сил крипа в обеих точках.

Исходными данными для процедуры FastSim являются следующие параметры и переменные: свойства материала колеса и рельса (коэффициент Пуассона и модуль упругости), главные кривизны поверхностей в точке контакта, нормальная реакция в контакте N . Процедура FastSim рассчитывает полуоси эллиптического пятна контакта в соответствии с теорией Герца, величину крипов ξ_x , ξ_y и спина ϕ . В области сцепления решается система дифференциальных уравнений относительно касательных напряжений, в области скольжения – дифференциально-алгебраических уравнений. Пятно контакта разбивается на узкие полосы одинаковой ширины, каждая полоса состоит из одинакового числа элементов, имеющих равные размеры [155].

В программном комплексе «Универсальный механизм» реализована полуаналитическая модификация классического алгоритма FastSim в виде процедуры FastSim-A (FastSim – Analytic). FastSim-A выигрывает в быстродействии к FastSim примерно в два раза и даёт очень близкие результаты расчёта сил крипа при сравнительно небольших значениях спина ($\phi < 0,5$).

Метод Минова применяется при расчёте сил крипа на основе эмпирической зависимости силы сцепления колёсных пар локомотива от скорости проскальзывания. Силы крипа рассчитываются по следующим формулам.

$$F_{xy} = f \cdot N \cdot k \cdot |\xi|, \quad F_x = -F_{xy} \frac{\xi_x}{\xi}, \quad F_y = -F_{xy} \frac{\xi_y}{\xi}, \quad (4.6)$$

где k – отношение силы сцепления (крипа) к её предельному значению при заданном состоянии рельсов.

В эксплуатации кривая Минова имеет стохастический характер. Для удобства участки кривой сцепления аппроксимированы тремя выражениями [31].

1. На участке упругого пропорционального проскальзывания при $0 \leq |\xi| \leq 0,0014$ коэффициент сцепления $k = 359,61178 \cdot |\xi|$.

2. На участке упругого проскальзывания при $0,0014 < |\xi| \leq 0,025$

$$k = \frac{350 \cdot |\xi| - 0,155}{0,195 + 336 \cdot |\xi|}$$

3. На участке избыточного скольжения (буксования) при $|\xi| > 0,025$

$$k = \frac{1}{1 - \chi \cdot v_0 \cdot (0,025 - |\xi|)},$$

где v_0 – продольная скорость движения, м/с; χ – жёсткость падающего (третьего) участка характеристики. При скорости колёсной пары от 0 до 5 км/ч принимается $\chi = 0,9$; при скорости от 5 до 20 км/ч $\chi = 0,6$ [155].

На первом этапе моделирования определены площади пятен контакта и поперечные положения колёсных пар локомотива ЧМЭЗ при разгоне от 0 до 12 км/ч. На втором этапе полученные данные импортировались в Matlab, где система регулирования задавала намагничивающий ток индукторов для поддержания сцепления за счёт коэффициента трения между поверхностями колеса и рельса. На заключительном этапе в UM Loco повторялся расчёт с заданными значениями коэффициентов трения на поверхностях катания, выкружках и гребнях.

Движение тепловоза ЧМЭЗ происходило в пределах S – образной кривой, уложенной рельсами типа Р65, моделирование выполнялось для новых и изношенных профилей. Часть поверхности катания изношенной головки рельса очерчена линией переменного радиуса от 280 до 310 мм. Прокат на поверхности катания изношенного локомотивного колеса приблизился к допустимой величине 5 мм, вместо коничности крутизной 1:20 ближе к выкружке гребня сформировалась выпуклая кривизна радиусом от 630 до 660 мм. Новые профили локомотивного колеса и головки рельса Р65 приняты согласно [163, 164]. Графики изменения суммарной площади контакта левого и правого колёс в зависимости от поперечного положения колёсной пары в рельсовой колее приведены на рисунке 4.5.

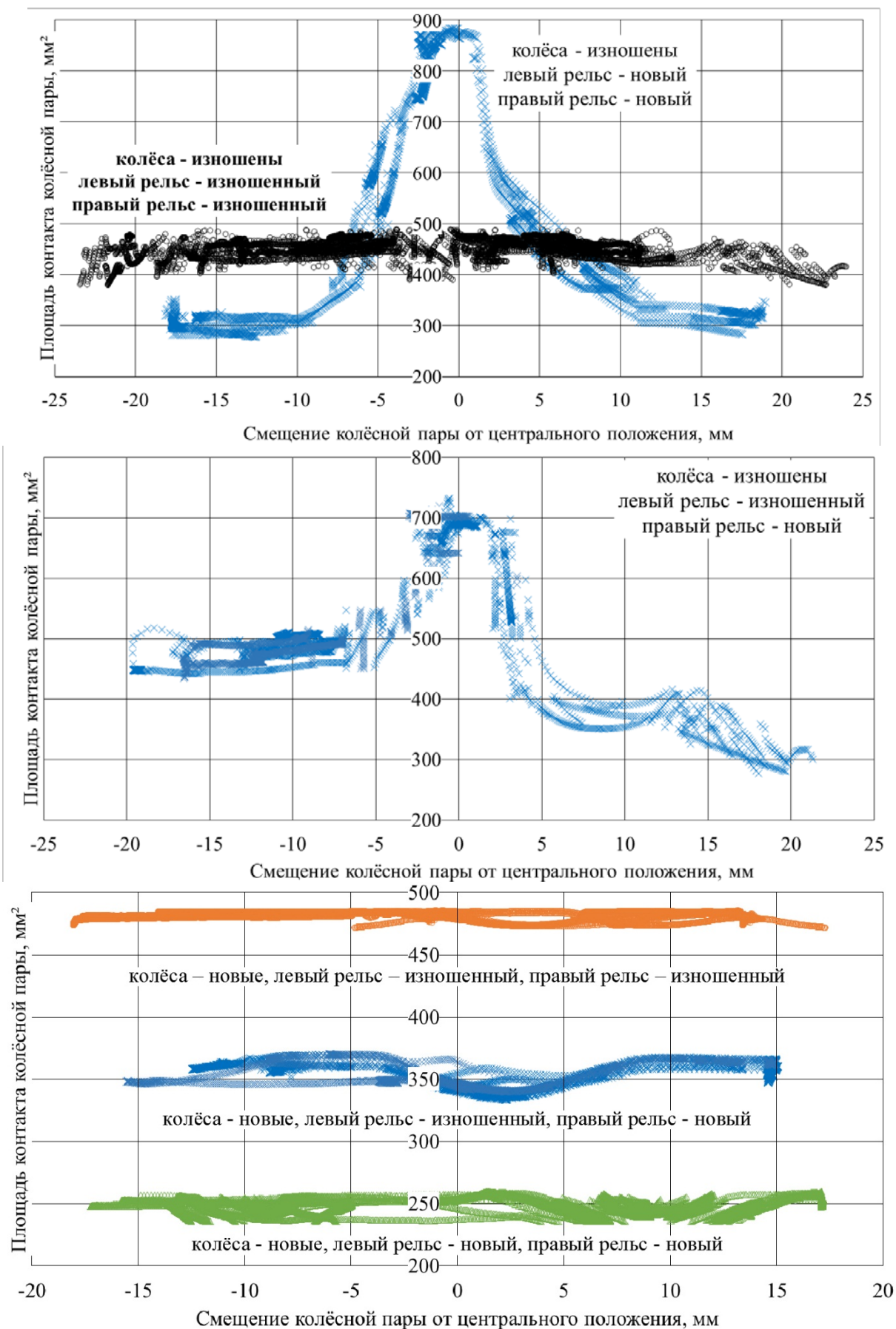


Рисунок 4.5 – Площади пятна контакта колёсных пар с рельсами от поперечного положения в колее

Каждому положению колёсных пар тепловоза в рельсовой колее соответствует коридор значений площади, это объясняется непостоянством скорости и сил, передаваемых на колёса. При определении площади контакта между колесом и рельсом должен учитываться комплекс особенностей контактирующих профилей, что требует сложного программирования и длительного времени вычислений. Точное решение контактной задачи с использованием методов теории упругости приводит к интегральным уравнениям, решение которых аналитическим способом сложно, а порой невозможно. В первом приближении, с достаточной степенью точности, допускается при решении контактной задачи за счёт упрощений перейти от интегральных уравнений к алгебраическим [155].

4.2 Программа моделирования поперечного положения колёсной пары в колее

Как было показано в первом разделе, на размеры пятна контакта между поверхностью катания колеса и рельсом влияние оказывает величина передаваемых усилий, а также радиус колеса, рисунок 1.4. Кроме того, в формировании контактного пятна участвуют и такие параметры как: геометрия профиля, величина возвышения рельса, его подуклонка, положение колёсной пары в колее [123].

Перемещение колёсной пары в рельсовой колее позволяет при каждом положении определить на профиле точки наибольшего упругого проникновения. В рамках решения задачи по определению геометрических параметров положения колёсной пары железнодорожного подвижного состава в рельсовой колее написана «Программа моделирования поперечного положения колёсной пары в колее» [127]. Программа разработана в среде Visual LISP [165-167], для обмена данными с Visual Basic for Applications задействован интерфейс AutoCAD ActiveX Automation Interface, применена технология объектно-ориентированного программирования. Программный код включает 14 модулей, использующих язык функционального программирования AutoLisp, основные структурные данные представлены списками.

Программа позволяет исследовать контактирование профиля колеса с профилем рельса и величину зазора между ними, определять очертания контактного пятна [123]. В основе работы программы лежат итерационные алгоритмы. Семейство поперечных положений колёсной пары формируется смещением колёсной пары в пределах зазора между внутренними гранями рельса и гребнями. Для крайних и промежуточных положений колёсной пары рассчитывается смещение в колее, наклон колёсной пары и угол контакта колеса с рельсом, определяется очертание и контурная площадь контактной поверхности [130].

Контурная площадь обуславливается преимущественно волнистостью контактирующих поверхностей, для колеса и рельса волнистость незначительна: шаг волны превышает высоту в 200-500 раз. Это позволяет рассматривать контурную площадь между колесом и рельсом как результат упругой деформации волнистости. Размеры волнистости соизмеримы с номинальным контактом: на номинальную поверхность приходится одна или две волны, в этих условиях размеры номинальной и контурной площади примерно равны [12].

Промежуточные положения колёсной пары соответствуют случаю, когда гребни колёс не касаются рельса, одно из промежуточных положений является центральным. Крайние положения колёсной пары формируются двухточечным гребневым контактом колёс с левым и правым рельсом. К входным данным программы относятся следующие параметры: минимальный зазор между колесом и рельсом для задания точности расчёта, число промежуточных положений колёсной пары, диаметр колеса по кругу катания, величина наибольшего проникновения на поверхности катания и гребне колеса, профиль колёсной пары, профиль левого и правого рельса, наличие возвышения рельса и уширения колеи. Искомые положения колёсной пары в колее определяются итерациями плоскопараллельного перемещения профиля колёсной пары относительно профиля левого и правого рельса. На каждом этапе выполняется контроль зазора между поверхностями катания, гребнями колёс и рельсами. Выполнение условий величины минимальных зазоров позволяет перейти к расчёту следующего положения колёсной пары в колее [123], рисунок 4.6.

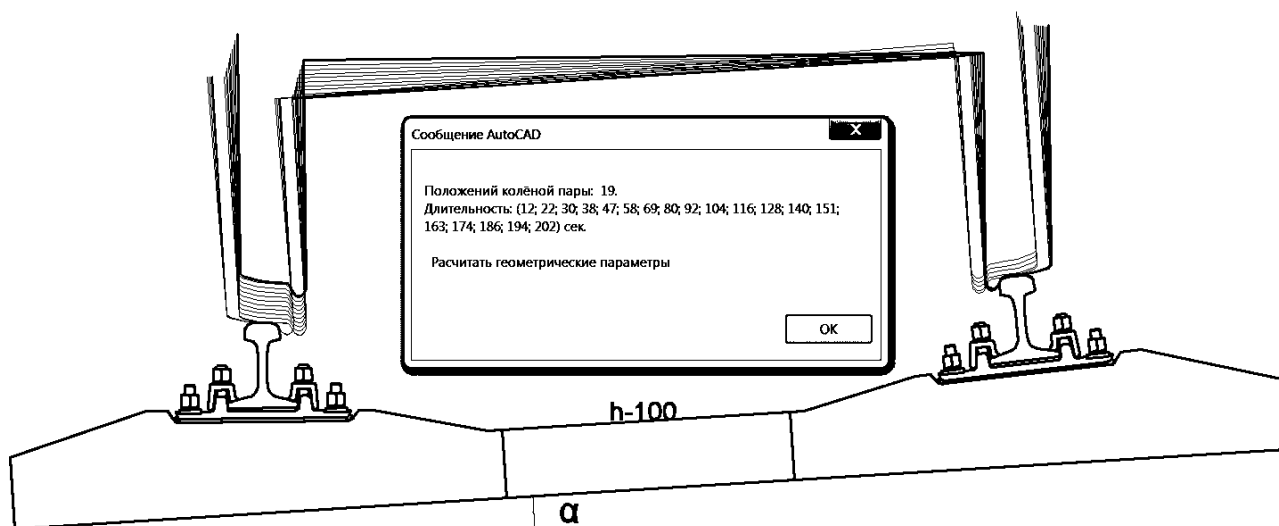
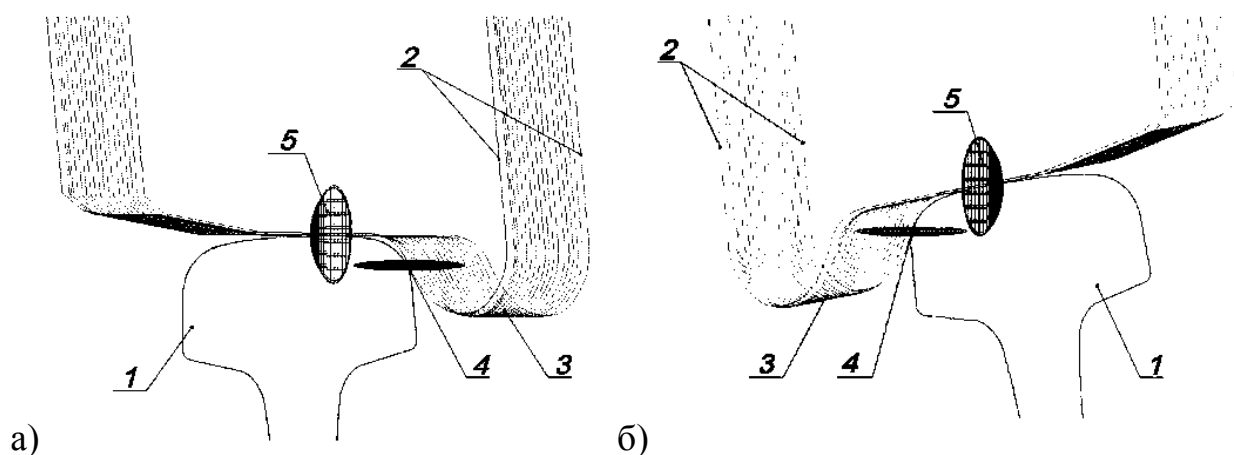


Рисунок 4.6 – Итерационное определение положения колёсной пары в колее

После построения поперечных положений колёсной пары в колее определяется площадь контакта колеса с рельсом [123], рисунок 4.7.



а – контакт с левым рельсом; б – контакт с правым рельсом;

1 – рельс; 2 – крайние положения колёс; 3 – промежуточные положения колёс;
4, 5 – пятно контакта на гребне и поверхности катания.

Рисунок 4.7 – Площадь контакта колеса с рельсом

Точечный контакт, посредством смещения координат профиля на величину проникновения, вырождается в область пересечения. Вращение нижней границы области пресечения относительно оси колёсной пары и вытягивание верхней границы в продольном направлении формирует тело контакта, ограниченное поверхностями контакта. Число выполненных итераций и время расчёта отображаются в информационных сообщениях. Результаты расчёта и геометрические параметры

поперечных положений колёсной пары железнодорожного подвижного состава в рельсовой колее выводятся на экран и сохраняются в файл для дальнейшей обработки [123].

В условиях движения с малыми скоростями нагрузка на колесо принимается постоянной. Программа моделирования поперечного положения колёсной пары в колее позволяет исследовать взаимодействие новых, а также изношенных колёс и рельсов, реальное пятно контакта имеет неэллиптическую форму. Полученные данные (приложение А) хорошо коррелируются с результатами моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм», рисунок 4.5.

В приложении А приведены параметры контактирования профилей локомотивных колёс диаметром 1050 мм и 1250 мм с рельсами Р65 при различных поперечных положениях колёсной пары в колее. Моделирование выполнено для новых и изношенных профилей с возвышением правого рельса h от 0 до 150 мм, рисунок 4.8.

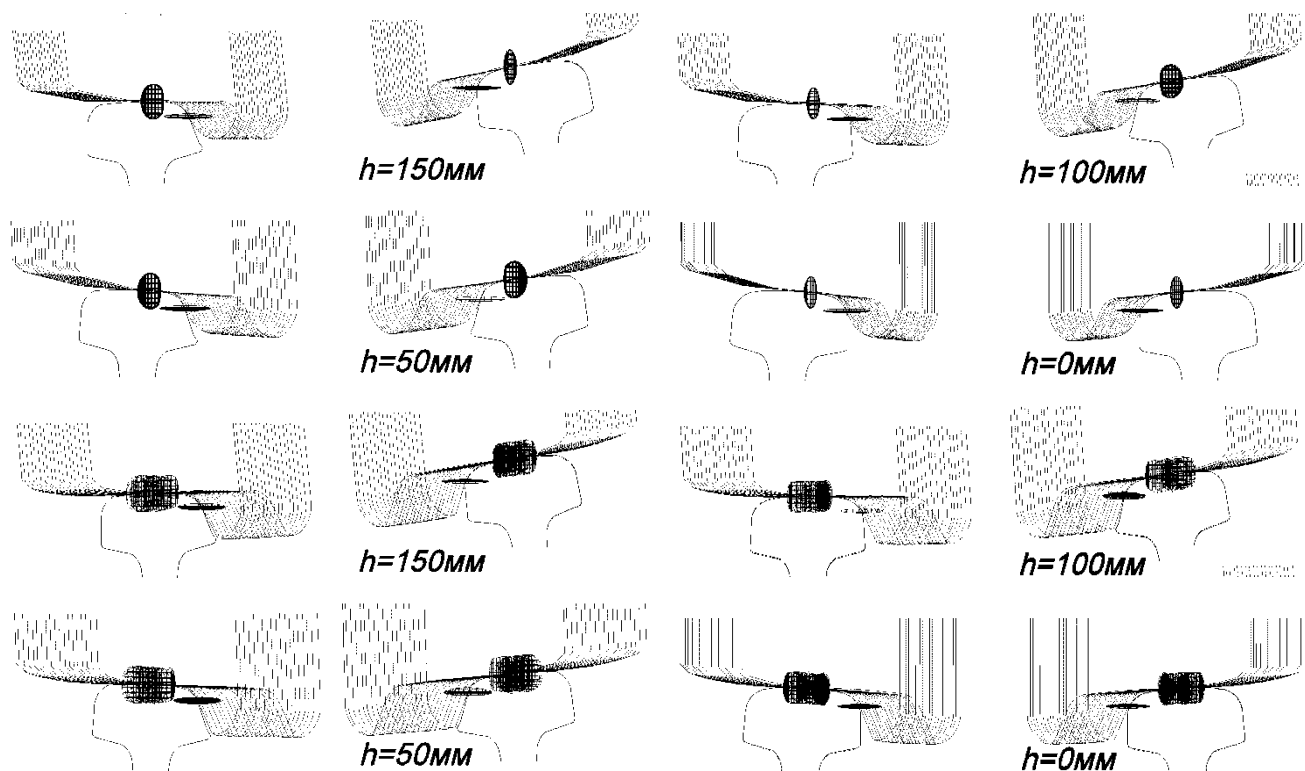


Рисунок 4.8 – Положения новой и изношенной колёсной пары в рельсовой колее

На рисунке 4.9 построены графики зависимости площади контакта на поверхности катания колеса S_K от зазора между гребнем колеса и рабочей гранью

головки рельса δ . Профиль колёс новый, рельс – изношенный. Площадь контакта на поверхности катания левого и правого колеса возрастает по мере увеличения зазора. Разброс значений площади на поверхности катания для одного колеса не превышает 13 мм^2 . При контакте гребня с рельсом, когда $\delta=0 \text{ мм}$, прирост площади контакта колеса 1050 мм составляет от 82 до 91 мм^2 , колеса 1250 мм – от 90 до 99 мм^2 . Наибольший единовременный перекося площадей между левым и правым колесом при двухточечном контакте: $\Delta S_{\text{max}}^{1050} = 84 \text{ мм}^2$ и $\Delta S_{\text{max}}^{1250} = 93 \text{ мм}^2$ [123].

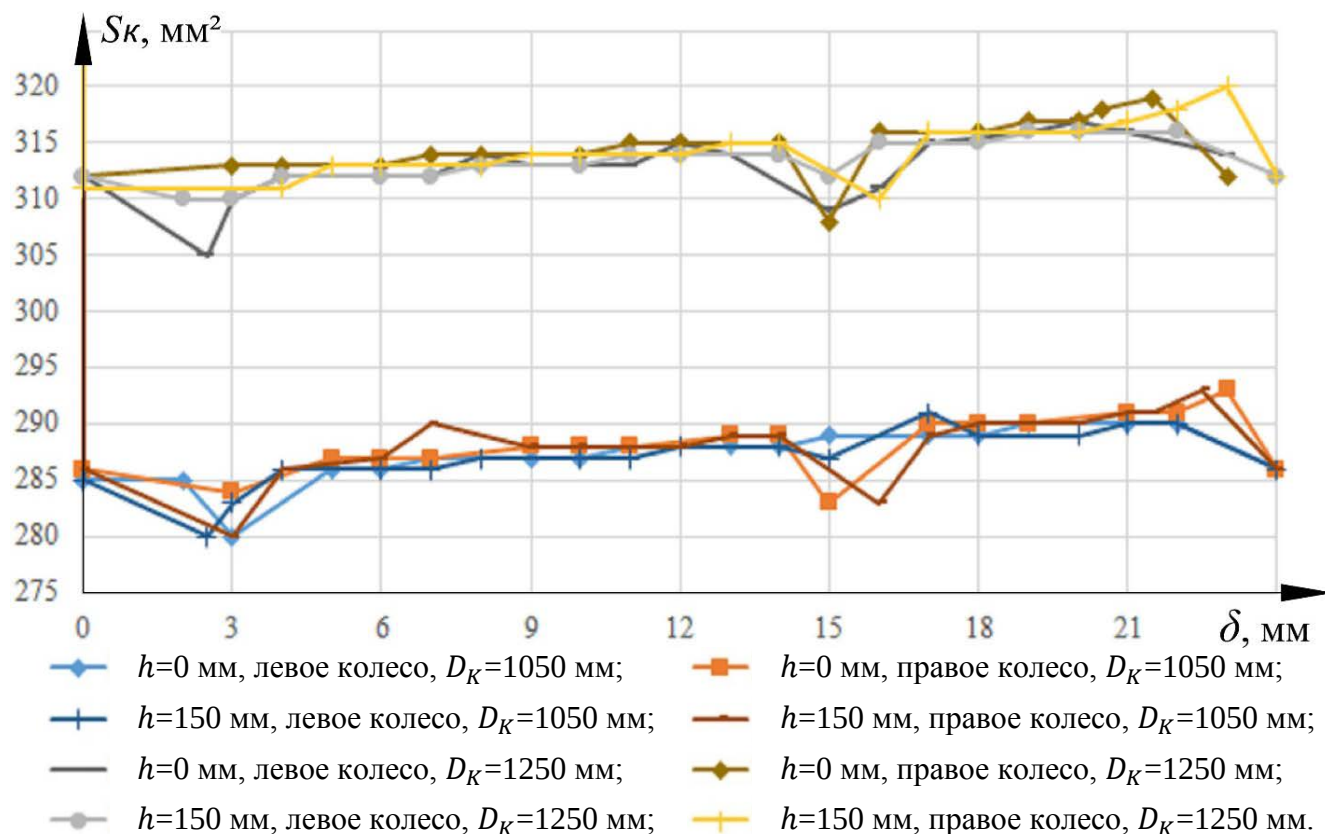


Рисунок 4.9 – Зависимость площади контакта на поверхности катания колеса от зазора между гребнем колеса и рельсом

На зависимости $S_K(\delta)$ видны характерные участки возрастания ($\delta \approx 23 \text{ мм}$, $\delta \approx 7 \text{ мм}$) и уменьшения ($\delta \approx 3 \text{ мм}$, $\delta \approx 15 \text{ мм}$) площади контакта. Данные всплески объясняются расположением контакта относительно перелома профиля колеса. Когда контакт приходится на перелом профиля, площадь уменьшается. Расположение контакта между переломами профиля соответствует возрастанию площади. Таким образом, для снижения разброса площади, должно выполняться условие плавности изменения кривизны профиля на поверхности катания. Иначе говоря, первая

производная от функции профиля по горизонтальной координате должна быть гладкой функцией и не должна иметь разрывов. В процессе приработки поверхности катания колеса переломы профиля скругляются и функция профиля становится гладкой. Профиль нового или недавно обточенного колеса не соответствует условию плавности изменения кривизны [123].

Профессор А.П. Буйносов рассматривал технологию обточки бандажей локомотива с сохранением остаточного проката. На поверхности остаётся накатанная полоса шириной до 20 мм, которая способствует снижению скольжения. В месте контакта нового бандажа с новым рельсом образуется близкая к эллипсу площадка размерами от 1,5 до 2,0 см² [168].

Характер распределения контактных сил и форма контакта колеса с рельсом зависит от положения колёсной пары в рельсовой колее. Конусность профиля колеса, наличие возвышения рельса, уширение колеи, износ верхнего строения пути и ходовых частей подвижного состава обуславливают перекося колёсной пары в колее на угол γ . Оценка влияния на размеры контактного пятна каждого фактора в отдельности позволит выделить наиболее значимые. Возвышение наружного рельса h в криволинейном участке пути устраивается путём увеличения толщины балластного слоя под шпалой. При этом рельсовая колея относительно края шпалы наклоняется на угол α [123], рисунок 4.6.

$$\alpha = \arcsin \frac{h}{1600 + u}, \quad (4.7)$$

где $1600+u$ – расстояние между осями левого и правого рельса с учётом уширения колеи.

Результаты моделирования позволяют выразить связь угла наклона колёсной пары, с углами контакта на поверхности катания колёс и возвышением.

$$\gamma = \gamma_0 + \alpha = \frac{\beta_{\text{л}} + \beta_{\text{п}}}{2}, \quad (4.8)$$

где γ – угол наклона колёсной пары; γ_0 – угол наклона колёсной пары при нулевом возвышении; $\beta_{\text{л}}$ – угол контакта на поверхности катания левого колеса; $\beta_{\text{п}}$ – угол контакта на поверхности катания правого колеса [123].

4.3 Аппроксимация профиля, условия конформности контакта

Касательная к профилю определяется при помощи производной от функции профиля по горизонтальной координате. Для вычисления точек контакта и угла контакта в каждой из них следует иметь уравнения профилей колеса и рельса. Профили колеса и рельса определяются совокупностью отрезков и дуг окружностей, лежащих в плоскости YZ [163, 164]. Поверхность катания головки нового рельса Р65 имеет симметричное выпуклое криволинейное очертание: радиус 500 мм переходит в радиус 80 мм, сопряжение поверхности катания с боковыми гранями выполняется дугой радиусом 15 мм. Выкружка гребня нового колеса выполнена радиусом 13,5 мм, близким к закруглению головки рельса, в процессе эксплуатации это способствует плотному прилеганию гребня колеса к головке рельса, рисунок 4.10.

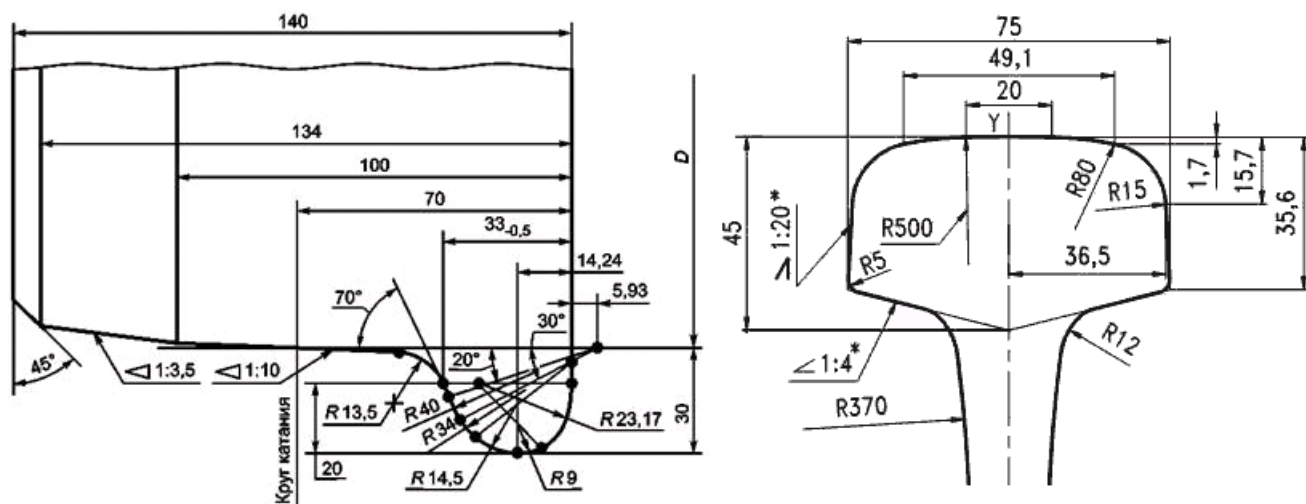


Рисунок 4.10 – Профили локомотивного колеса и головки рельса Р65 [163, 164]

В работе [169] профиль колеса разделён на восемь сегментов и аппроксимируется прямыми, полиномами, окружностями.

$$z(y_B) = a_B + b_B \cdot y_B + c_B \cdot y_B^2 - d_B \cdot y_B^3 + e_B \cdot y_B^4 - f_B \cdot y_B^5 + g_B \cdot y_B^6 - h_B \cdot y_B^7 + i_B \cdot y_B^8. \quad (4.9)$$

Кусочная аппроксимация не позволяет получить гладкую функцию, ступенчатость явно выражается при дифференцировании таких функций, кроме того, ограничен диапазон применения выражений. Известно, что любая непрерывная периодическая функция, удовлетворяющая условиям Дирихле, раскладывается в ряд

Фурье. Если функция непериодическая, то после разложения она станет периодической [170].

$$\begin{aligned} z(y) = & \frac{a_0}{2} + (a_1 \cdot \cos(y) + b_1 \cdot \sin(y)) + (a_2 \cdot \cos(2y) + b_2 \cdot \sin(2y)) + \dots \\ & \dots + (a_g \cdot \cos(gy) + b_g \cdot \sin(gy)) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos(ny) + b_n \cdot \sin(ny)), \end{aligned} \quad (4.10)$$

где n – номер гармоники; g – число гармоник, $g = \max(n)$;

a_0, a_n, b_n – коэффициенты Фурье [170]:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} z(y) dy, \quad a_n = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} (z(y) \cdot \cos(ny)) dy}{\int_{-\pi}^{\pi} (\sin(y) \cdot \sin(y)) dy} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (z(y) \cdot \cos(ny)) dy, \\ b_n &= \frac{\int_{-\pi}^{\pi} (z(y) \cdot \sin(ny)) dy}{\int_{-\pi}^{\pi} (\sin(y) \cdot \sin(y)) dy} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (z(y) \cdot \sin(ny)) dy. \end{aligned}$$

Ранние работы автора [132-135] были посвящены вопросам аппроксимации нелинейных зависимостей, в том числе магнитных характеристик, используемых для расчёта магнитных цепей и электромагнитных устройств. Было установлено, что использование рядов Фурье позволяет получить аналитические выражения с высокой степенью сходимости исходных и расчётных значений. Данная особенность особенно ценна в условиях, когда между профилем колеса и профилем рельса требуется отслеживать зазоры величиной в десятые доли миллиметра.

Последовательность разложения профиля колеса в ряд Фурье представлена в работе [126]. В начале зададим координаты характерных точек профиля: $(y_1, z_1) \dots (y_m, z_m); (y_{m+1}, z_{m+1}) \dots (y_{k+1}, z_{k+1})$, число точек $k + 1$. Функцию $z(y)$ с периодом $2T$ можно составить из k частичных функций, каждая из которых соединяет две смежные точки с координатами (y_m, z_m) и (y_{m+1}, z_{m+1}) . Таким образом, коэффициенты Фурье будут состоять из суммы k определённых интегралов от частичных функций.

$$\begin{aligned}
a_0 &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^{y_1} z_1(y) dy + \frac{1}{T} \int_{y_1}^{y_2} z_2(y) dy + \dots + \frac{1}{T} \int_{y_k}^{y_{k+1}} z_k(y) dy = \frac{1}{T} \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} z_m(y) dy, \\
a_n &= \frac{2}{T} \cdot \int_0^{y_1} \left(z_1(y) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \frac{2}{T} \int_{y_1}^{y_2} \left(z_2(y) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \dots \\
&\dots + \frac{2}{T} \int_{y_k}^{y_{k+1}} \left(z_k(y) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy = \frac{2}{T} \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} \left(z_m(y) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy, \\
b_n &= \frac{2}{T} \cdot \int_0^{y_1} \left(z_1(y) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \frac{2}{T} \int_{y_1}^{y_2} \left(z_2(y) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \dots \\
&\dots + \frac{2}{T} \int_{y_k}^{y_{k+1}} \left(z_k(y) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy = \frac{2}{T} \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} \left(z_m(y) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy, \tag{4.11}
\end{aligned}$$

где $z_m(y)$ – частичная функция, рассматриваемая в интервале от y_m до y_{m+1} ; m – номер частичной функции, $\max(m) = k$.

Коэффициенты Фурье для профиля колеса рассчитаны в приложении В. При определении коэффициентов Фурье, в качестве частичной функции $z_m(y)$, используется прямая линия, выраженная уравнением следующего вида.

$$z_m(y) = \left(\frac{z_{m+1} - z_m}{y_{m+1} - y_m} \right) y + z_m + \frac{y_m(z_{m+1} - z_m)}{y_{m+1} - y_m} = p_m y + c_m. \tag{4.12}$$

Каждая прямая рассматривается на отрезке, ограниченном точками с координатами (y_m, z_m) и (y_{m+1}, z_{m+1}) . Причём, конец m отрезка будет началом $m+1$ отрезка. С учётом изложенного, выражение (4.10) примет вид.

$$\begin{aligned}
z(y) &= \frac{1}{2T} \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} (p_m y + c_m) dy + \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} \left((p_m y + c_m) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy \right) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) + \right. \\
&\left. + \left(\sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} \left((p_m y + c_m) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy \right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right]. \tag{4.13}
\end{aligned}$$

При заданном числе гармоник g график функции $z(y)$ пульсирует относительно профиля колеса. Увеличение числа гармоник ($g \rightarrow \infty$) уменьшает амплитуды пульсаций, в тоже время повышается трудоёмкость вычислений. Графики профиля локомотивного колеса, построенные по аналитическим зависимостям для семи и двадцати гармоник, наложены на исходный профиль, рисунок 4.11.

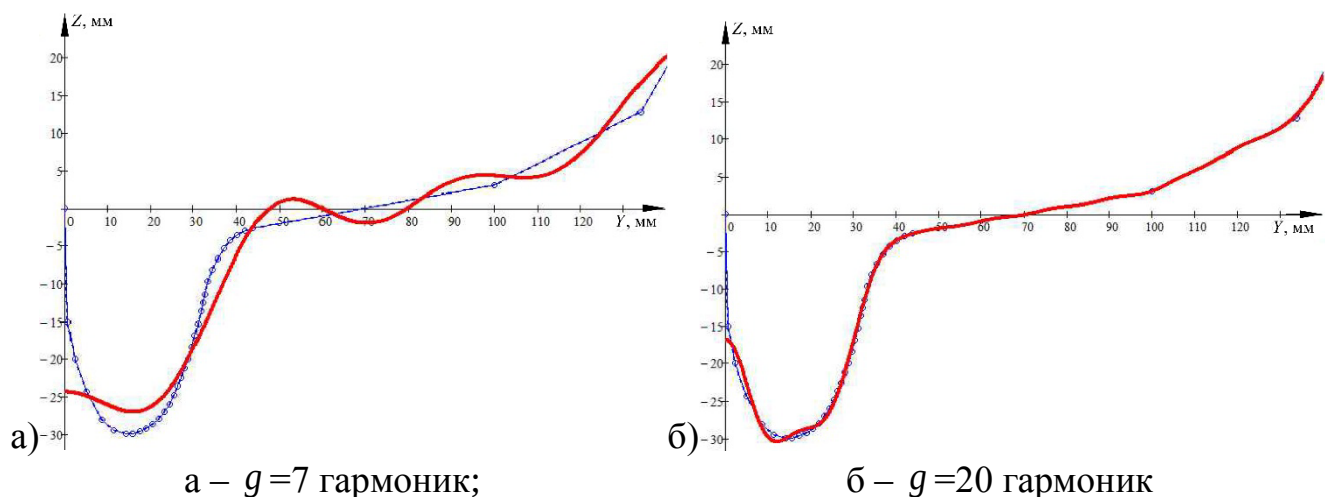


Рисунок 4.11 – Аппроксимация профиля колеса локомотива

При малом числе гармоник наблюдается явно выраженная пульсация со смешанной монотонности аналитического графика, рисунок 4.11 а. Первый способ повышения точности аппроксимации основан на увеличении числа гармоник, рисунок 4.11 б. Сходимость аналитического профиля с исходным при двадцати гармониках лучше, чем при семи гармониках [126]. Другой способ сглаживания пульсаций основан на использовании вспомогательной функции, пульсации которой относительно профиля находятся в противофазе к $z(y)$. Среднее значение этих функций будет соответствовать профилю в большей степени, чем каждая по отдельности. Искомая функция представлена выражением (4.14), для компактности сделаны замены: $f_m = p_m y + c_m$; $f_k = p_k y + c_k$.

$$\begin{aligned}
 z(y) = & \frac{1}{2T} \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} f_m dy + \frac{1}{T} \sum_{n=1}^g \left[\left(\sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} \left(f_m \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy \right) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) + \right. \\
 & \left. + \left(\sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} \left(f_m \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy \right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right] + \frac{g}{2T(g+1)} \left(\int_{y_{k+1}}^{y_{k+1} + \frac{T}{g}} f_k dy + \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} f_m dy \right) + \\
 & + \frac{g}{T(g+1)} \sum_{n=1}^{g+1} \left[\int_{y_{k+1}}^{y_{k+1} + \frac{T}{g}} \left(f_k \cdot \cos\left(\frac{\pi n y g}{g+1}\right) \right) dy + \left(\sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} \left(f_m \cdot \cos\left(\frac{\pi n y g}{g+1}\right) \right) dy \right) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y g}{g+1}\right) + \right. \\
 & \left. + \int_{y_{k+1}}^{y_{k+1} + \frac{T}{g}} \left(f_k \cdot \sin\left(\frac{\pi n y g}{g+1}\right) \right) dy + \left(\sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} \left(f_m \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy \right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right]. \quad (4.14)
 \end{aligned}$$

Для любой n -ой гармоники ряда Фурье можем получить уравнение, записанное в традиционном виде [170]. Таким образом, функция профиля колеса будет представлена в виде суммы тригонометрических функций с различными частотами, амплитудами и фазами. Данная аппроксимация позволяет получить гладкую функцию профиля колеса $Z_K(y)$.

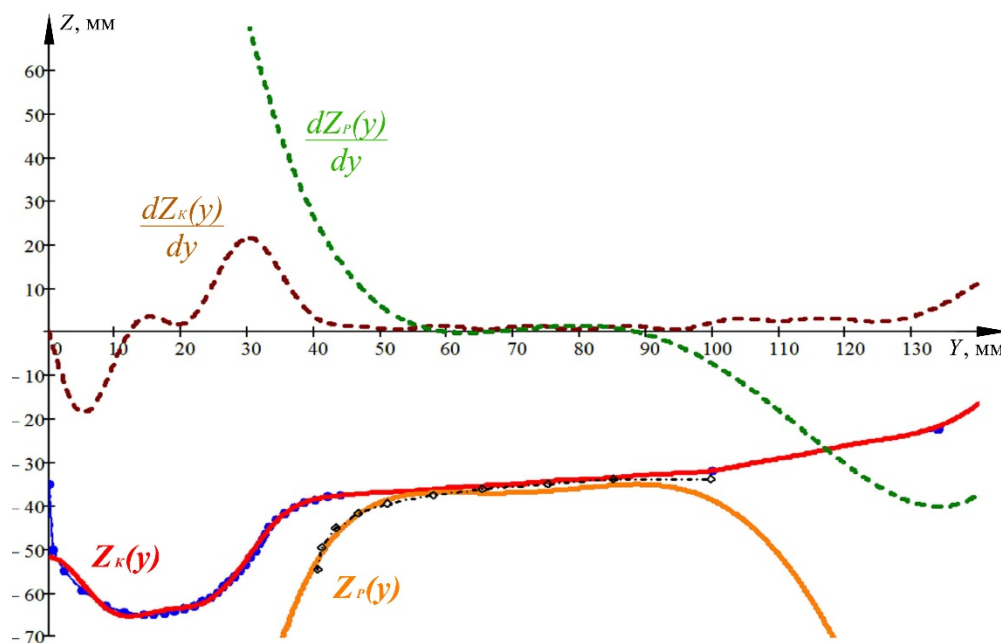
$$Z_K(y) = \sum_{n=1}^q A_n \cdot \sin(n\omega y + \varphi_n), \quad (4.15)$$

где A_n – амплитуда n -ой гармоники ряда Фурье; ω – частота основной гармоники; φ_n – фаза n -ой гармоники.

Уравнение профиля локомотивного колеса приведено в приложении В. Касательная к профилю в каждой его точке характеризуется производной от функции профиля по горизонтальной координате, поэтому при аппроксимации важно сохранять монотонность аналитического профиля с исходным [171].

Аппроксимацию рабочих поверхностей профиля рельса можно выполнить с помощью полинома $Z_P(y)$ [172]. Точки контакта профилей колеса и рельса определяются как равенство первых производных от функций профилей по горизонтальной координате [123], рисунок 4.12.

$$\frac{dZ_K(y)}{dy} - \frac{dZ_P(y)}{dy} = \frac{d(Z_K(y) - Z_P(y))}{dy} = 0. \quad (4.16)$$



$Z_K(y)$ – аппроксимация профиля колеса;
 $Z_P(y)$ – аппроксимация профиля рельса;
 $\frac{dZ_K(y)}{dy}$ – производная профиля колеса;
 $\frac{dZ_P(y)}{dy}$ – производная профиля рельса

Рисунок 4.12 – Графики функций профилей колеса и рельса и их производных

Таким образом, возможно аналитически исследовать взаимодействие колеса с рельсом сопоставлением уравнений профилей и их производных. Графически точки контакта на профилях колеса и рельса определяются через пересечение графиков первых производных по горизонтальной координате от функций профилей.

Наличие на контактирующих поверхностях участков схожего очертания способствует плотному прилеганию колеса к рельсу, в международной терминологии такие контакты принято называть конформными. В работе [154] конформные контакты подразделяются на однотоочечный и двухточечный, рисунок 4.13. При конформном гребневом контакте достигается наибольшая площадь взаимодействия поверхностей колеса и рельса, за счёт чего снижается интенсивность износа и ослабевают контактные напряжения. Контакт считается плотно конформным, когда зазор между недеформированным колесом и рельсом не превышает 0,1 мм. При зазоре величиной до 0,4 мм контакт еще можно считать конформным.

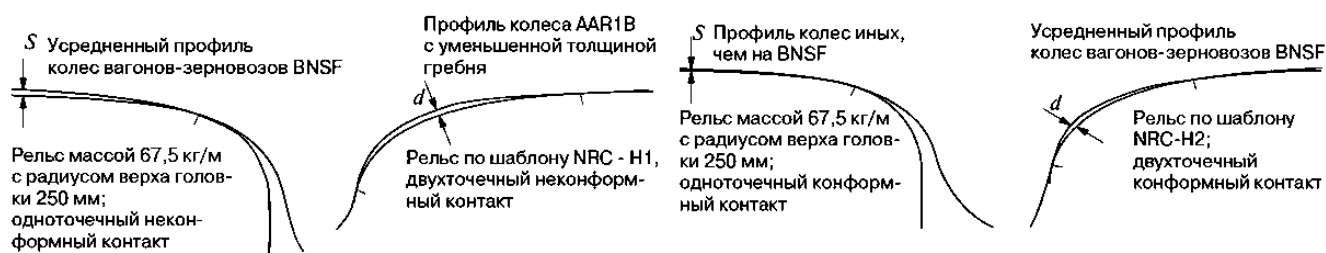


Рисунок 4.13 – Схемы контакта профилей колеса и наружного рельса [154]

В работе [131] отмечено, что указанный способ определения конформности контакта является несколько виртуальным, поскольку в условиях эксплуатации в зоне контакта колесо и рельс всегда деформированы. Условие плотного прилегания колеса к рельсу является достаточным для образования конформного контакта. Зазор между колесом и рельсом представлен выражением $\Delta(y) = Z_K(y) - Z_P(y)$. Функция зазора определяется для недеформированного колеса и рельса. Недеформированный точечный контакт профиля колеса с профилем рельса характеризуется наличием зазора Δ , который показывает насколько контакт будет плотным в результате деформации. Когда $\Delta \rightarrow 0$ контакт становится многоточечным. Упругие и пластические деформации, изнашивание колеса способствуют уменьшению кривизны поверхности, тем самым повышают конформность контакта.

Согласно (4.16) в точке контакта колеса с рельсом функция зазора имеет минимум, координата точки контакта на поверхности катания колеса y_K соответствует корню уравнения $\frac{\Delta(y)}{dy} = 0$ [129], рисунок 4.14. В том случае, когда функции колеса и рельса не имеют общих точек контакта $Z_K(y_K) \neq Z_P(y_K)$, следует переопределить функцию зазора $\Delta(y) = Z_K(y) - Z_P(y) - Z_K(y_K) + Z_P(y_K)$, при этом $\min \Delta(y) = 0$. Геометрически переопределение выражается параллельным смещением графика зазора к оси OY и возникновением точечного контакта [131].

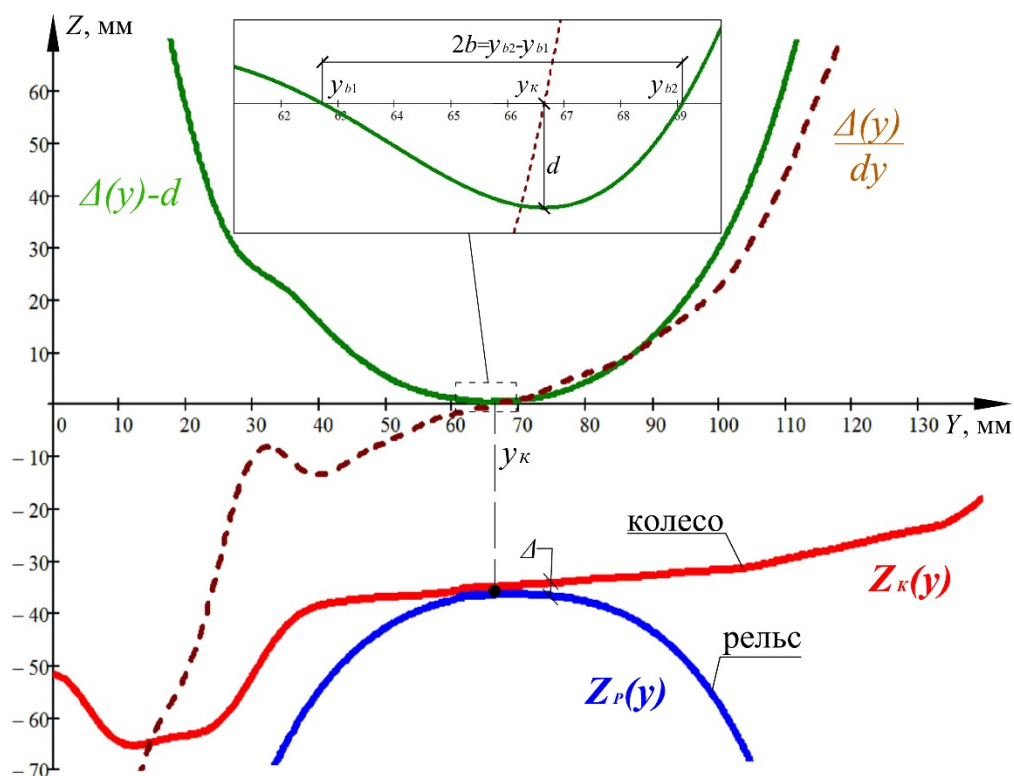


Рисунок 4.14 – Графики функции зазора и её производной

Дальнейший шаг заключается в определении ширины пятна контакта $2b$ и площади контакта S_K . Уменьшение функции зазора при точечном контакте на величину проникновения d , способствует появлению отрицательных значений зазора в области контактного пятна. Корни уравнения $\Delta(y) = d$ соответствуют границам пятна контакта y_{b1} , y_{b2} . Приняв, что пятно контакта плоское и имеет форму эллипса, рассчитаем его приблизительную площадь $S_K = 0,71\pi b\sqrt{D_K \cdot d}$, где половина ширины пятна контакта $b = 0,5(y_{b2} - y_{b1})$. Более точную величину площади определим, учитывая кривизну профиля колеса [129, 131].

Протяжённость контактного пятна $2b$, рассчитывается через определённый интеграл от функции колеса [173, с. 792]. Пределы интегрирования соответствуют границам пятна контакта.

$$2b = \int_{y_{b1}}^{y_{b2}} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_K(y)}{dy} \right)^2} dy, \quad S_K = 1,11 \sqrt{D_K \cdot d} \int_{y_{b1}}^{y_{b2}} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_K(y)}{dy} \right)^2} dy. \quad (4.17)$$

Моделирование поперечного положения колёсной пары в рельсовой колее (приложение А) показывает, что наибольшая ширина пятна контакта на поверхности катания составляет 26 мм.

Исследования А.М. Керопяна [174, 175] посвящены образованию конформного контакта в паре колесо – рельс карьерного железнодорожного транспорта. В условиях повышенных осевых нагрузок до 350 кН, предельную величину зазора между недеформированным колесом и рельсом можно увеличить до 0,8 мм, при этом контакт будет считаться конформным. Полоса изнашивания при плотно конформном контакте находится в пределах от 25 до 38 мм [154].

Протяжённость этого участка задаётся в зависимости от ширины контактного пятна $2b$. Примем, что точка контакта недеформированного колеса и рельса расположена в центре пятна контакта, тогда приблизительные координаты границ пятна контакта определяются как $y_K \pm b$.

Необходимым условием конформного контакта является наличие на профилях участков с кривизной одного знака, профили колеса и рельса должны быть выпуклой формы. Причём величина кривизны колеса в зоне контакта K_K не должна превышать кривизну рельса K_P . В работе [129] необходимые условия конформного контакта представлены в математической форме.

$$\left| \frac{K_K}{K_P} \right| \leq 1, \quad K_K \cdot K_P = \frac{\frac{Z_K(y_K)}{dy^2} \cdot \frac{Z_P(y_K)}{dy^2}}{\left(1 + \left(\frac{Z_K(y_K)}{dy} \right)^2 \right)^{1,5} \cdot \left(1 + \left(\frac{Z_P(y_K)}{dy} \right)^2 \right)^{1,5}} \geq 0. \quad (4.18)$$

Таким образом, для образования конформного контакта в точке контакта радиус профиля колеса R_{KK} должен быть больше или равен радиусу рельса R_{KP} .

В работе [131] получена зависимость радиусов на профиле колеса и рельса при различной степени конформности, рисунок 4.15.

$$R_{KP}(R_{KK}, \Delta, b) = \sqrt{\left[\sqrt{R_{KK}^2 - b^2} - \Delta - \frac{\Delta(2\sqrt{R_{KK}^2 - b^2} - \Delta)}{2(R_{KK} + \sqrt{R_{KK}^2 - b^2})} \right]^2} + b^2. \quad (4.19)$$

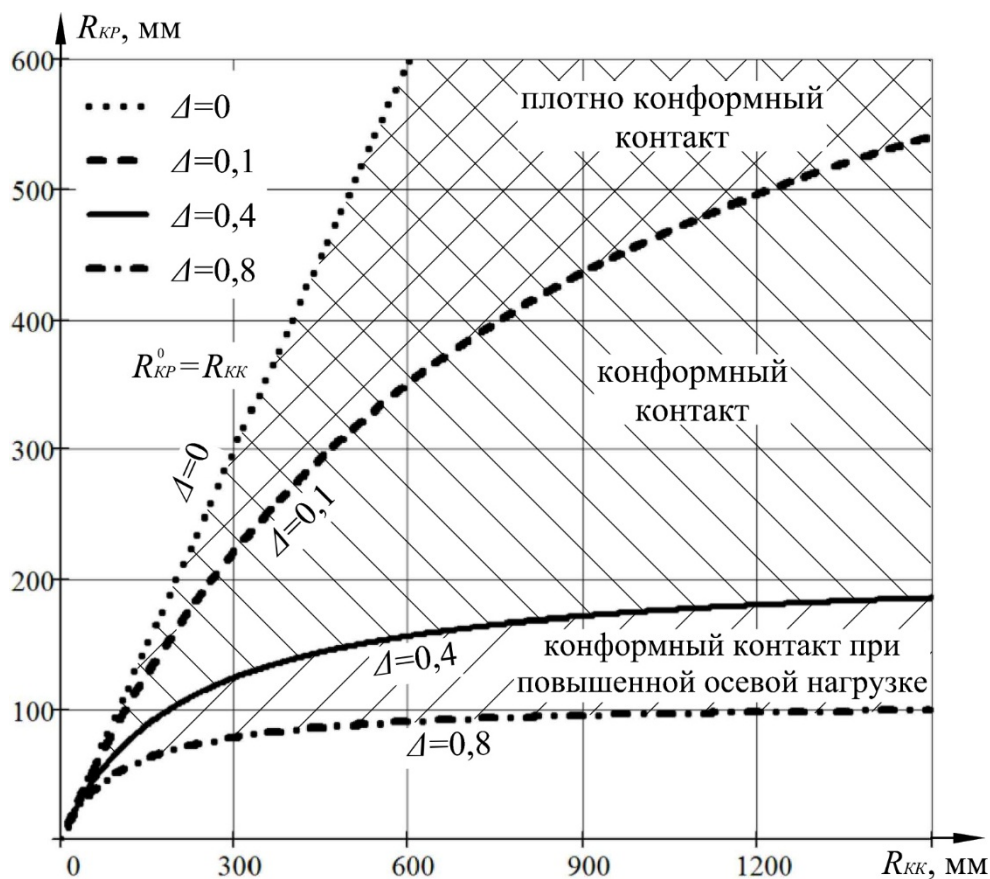


Рисунок 4.15 – Зависимость радиуса профиля рельса от радиуса профиля колеса при конформном контакте шириной $2b=26$ мм

Размеры контактного пятна существенно зависят от профиля колеса. Сопоставляя радиусы сопряжения поверхности катания и гребня нового колеса с радиусами головки нового рельса типа Р65 (рисунок 4.10), видим, что необходимые условия конформности не выполняются. Конформный контакт образуется в условиях приработки профиля колеса и профиля рельса [129]. Поскольку размеры площади контакта и ширина контактного пятна практически пропорциональны (приложение А), то по одному из этих параметров возможно выявлять конформность колеса и рельса в деформированном состоянии [131]. Ширина контактного пятна может отслеживаться устройством, работа которого основана на видеосъемке [176].

В первом приближении площадь контакта колеса с рельсом можно определить по законам контактной механики теории Герца, на основе аналитического исследования уравнений профилей, более точные значения площади неэллиптического контакта определяются при помощи моделирования. Результаты моделирования группируются для новых и изношенных профилей. 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.

Кажущаяся (номинальная) площадь контакта колеса с рельсом определялась опытным путём при помощи способа, основанного на снятии отпечатков [6]. В качестве промежуточной среды между колесом и рельсом использовалась фольга, сканирование и обработка изображения фольги позволили определить размеры пятен контакта колёс тепловоза ЧМЭЗ с рельсами, было проанализировано семь отпечатков колёс шестой оси, рисунок 4.16.

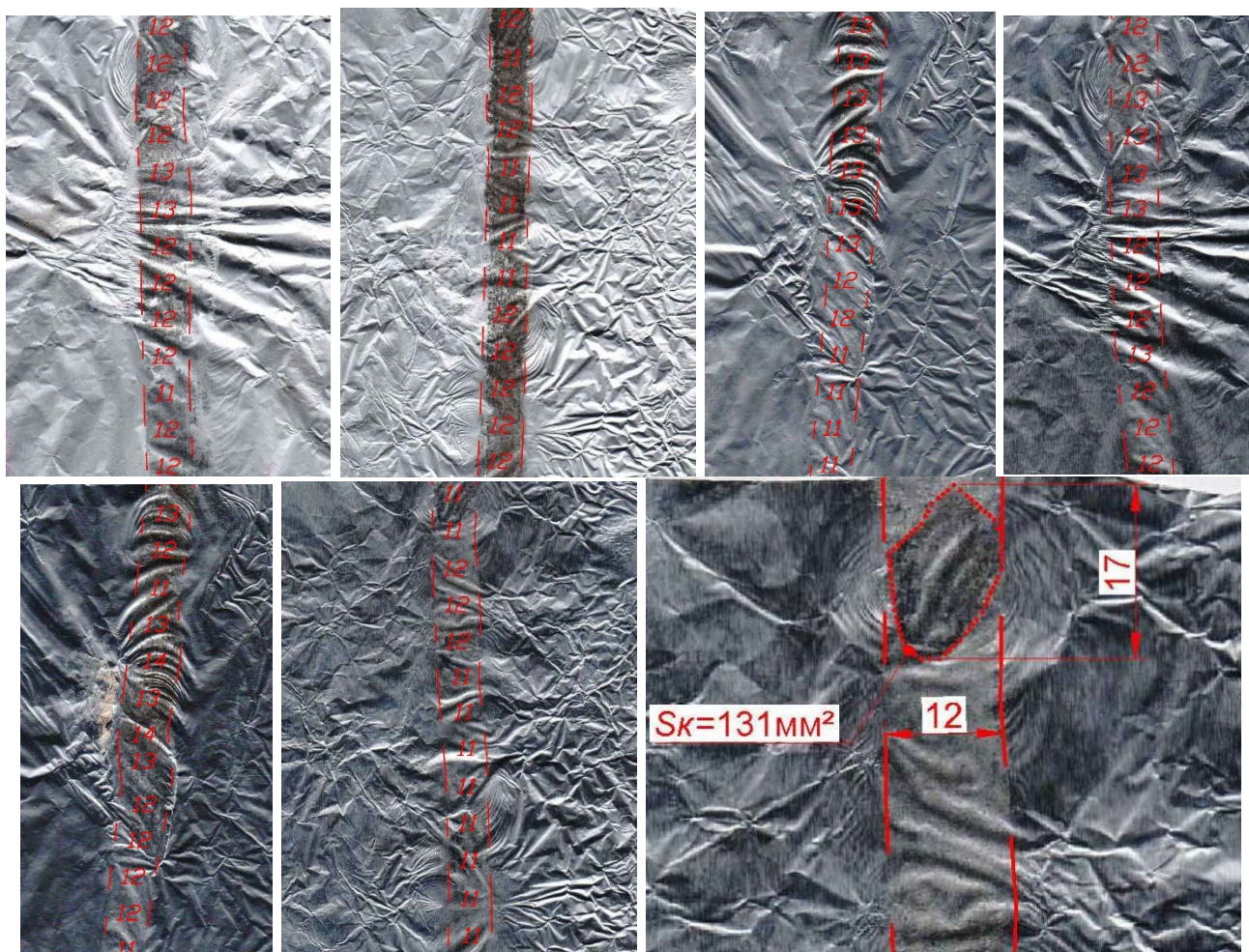


Рисунок 4.16 – Отпечатки контакта колёс тепловоза ЧМЭЗ с рельсами на фольге

Данные, собранные опытным путём, были дополнены результатами замера величины проката на поверхности катания и толщины гребня из журнала ТУ-17. Колёсные пары шестой оси тепловоза ЧМЭЗ имеют прокат колёс 0,5 мм, рисунок 4.17.

Тепловоз, МПС *тепловоз* серия *ЧМЭЗ* № *6008* ТУ-17

Страна (наим)		Наибольший прокат, мм		Наименьшая толщина гребня, мм		Наибольший износ гребня, мм		Наименьшая толщина боковины (за вычетом проката), мм		Наибольшая толщина боковины (за вычетом проката), мм		Углы наклона гребня к боковине, град		Углы наклона боковины к рельсу, град		Число выкатов за 1 прокат		Число выкатов за 1 прокат в мм		Прокат, мм		Толщина гребня, мм		Диаметр кругового гребня, мм		Толщина боковины, мм		Диаметр боковины, мм		Длина гребня, мм	Длина боковины, мм
1	26	8	43	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	26	26	75	75	43	43	926	926	40	конф.
2	0	0	26	26	8	8	75	75	51	51	100	100	40	40	926	926	40	40	100	100	40	40	926	926	40	40	926	926	40	конф.	
3	0,5	0,5	26	26	8	8	42	42	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	
4	0	0	26	26	8	8	42	42	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	
5	0	0	26	26	8	8	46	46	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	
6	0,5	0,5	26	26	7,5	7,5	43	43	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	
1	26	8	43	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	26	26	75	75	43	43	926	926	40	конф.
2	0	0	26	26	8	8	75	75	51	51	100	100	40	40	926	926	40	40	100	100	40	40	926	926	40	40	926	926	40	конф.	
3	0,5	0,5	26	26	8	8	42	42	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	
4	0	0	26	26	8	8	42	42	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	
5	0	0	26	26	8	8	46	46	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	
6	0,5	0,5	26	26	7,5	7,5	43	43	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	

Рисунок 4.17 – Фото страницы журнала ТУ-17

При снятии отпечатков тепловоз находился на прямом участке пути из примычных звеньев, уложенных новыми рельсами типа Р65. Измерения показывают, что контакты колёс с рельсами не являются конформными, по форме неэллиптические. Ширина неэллиптического контакта изменяется от 11 до 14 мм, преобладает ширина 12 мм, площадь контактного пятна составляет от 131 до 140 мм². Результаты моделирования (приложение А) показывают, что площадь контактного пятна нового колеса с новым рельсом находится в пределах от 119 до 128 мм², его ширина несколько уже, чем у прирабатываемого колеса, составляет 8 мм. Расхождение расчётных и измеренных площадей контакта не превышает 10 %.

Аналитическим способом получена площадь эллиптического контакта нового колеса с новым рельсом – 150 мм², пятно контакта шириной 6,9 мм более вытянуто в продольном направлении по сравнению с неэллиптическим. Расхождение площади контакта составляет от 15 до 21 %.

4.4 Выводы по разделу 4

1. При определении площади контакта между колесом и рельсом учтён комплекс геометрических особенностей контактирующих профилей. Аппроксимация профилей позволяет исследовать взаимодействие колеса с рельсом путём сопоставления уравнений профилей и их производных. В первом приближении площадь и ширину контакта можно определить аналитически. Более точные размеры неэллиптического контакта определяются в результате моделирования.
2. Плотное прилегание колеса к рельсу является достаточным условием образования конформного контакта. Необходимым условием конформного контакта является наличие на профилях участков с кривизной одного знака – профили колеса и рельса должны быть выпуклой формы, причём величина кривизны колеса в зоне контакта не должна превышать кривизну рельса.
3. Размеры площади контакта и ширина контактного пятна способствуют выявлению конформности колеса и рельса в деформированном состоянии, этот способ адаптирован для условий эксплуатации.

5 МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ КОЭФФИЦИЕНТА СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЁС С РЕЛЬСАМИ. ПРЕДЛОЖЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Улучшение сцепных свойств рельсового подвижного состава за счёт использования магнитных систем базируется на двух принципах: магнитное догружение и изменение триботехнических свойств пятна контакта колеса с рельсом [90]. Магнитное догружение способствует повышению сцепной нагрузки на рельсы за счёт использования магнитного блока, соединённого с рамой. Основное развитие магнитное догружение нашло в электромагнитных рельсовых тормозных системах городского, магистрального и промышленного транспорта [177].

В данном разделе приведены результаты испытаний маневрового тепловоза ЧМЭЗ с индукторным устройством увеличения сцепления колёс с рельсами, предложены способы использования магнитных усилителей сцепления на локомотивах. Выбраны места расположения индукторов, приведены режимы намагничивания, определён прирост силы тяги колёс тепловоза.

5.1 Магнитные усилители коэффициента сцепления колёс локомотива с рельсами

Для количественной оценки эффекта влияния магнитного поля на трибосистему локомотивные колёса – рельсы были проведены испытания на путях сервисного локомотивного депо «Елец» с использованием маневрового тепловоза ЧМЭЗ и изготовленного опытного образца индукторного устройства увеличения сцепления колёс с рельсами (приложение Б). Индукторное устройство увеличения сцепления (рисунок 5.1) представлено сборным сердечником 1 прямоугольного сечения и обмоткой 2, поверх которой расположен защитный слой 3. Длина сердечника составляет 1700 мм, вдоль сердечника намотано $W = 320$ витков алюминиевого провода сечением 5 мм², начало и конец обмотки отдалены от края сердечника для укладки устройства на рельсы. Для повышения конформности и снижения

магнитного сопротивления контактирующие с рельсами поверхности сердечника механически обработаны и имеют кривизну радиусом от 500 до 800 мм.

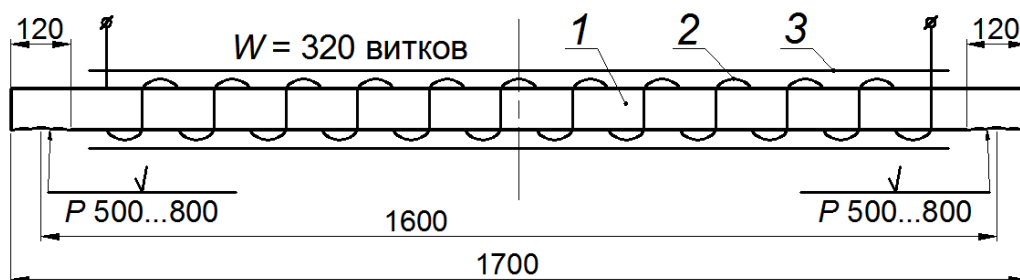


Рисунок 5.1 – Индукторное устройство увеличения сцепления колёс с рельсами

На рисунке 5.2 представлена схема подключения обмотки устройства. Обмотка И через сопротивление R и амперметр А подключена к вспомогательному генератору ВГ параллельно цепи электродвигателя вентилятора холодильника МВХ (провода № 100; 150). Коммутация цепи осуществляется выключателем В. Ток обмотки составляет 50 А, намагничивающая сила – $I_{\text{И}}W = 16000$ А-витков. Величина намагничивающей силы используемого устройства ограничена наибольшим током обмотки и мощностью вспомогательного генератора тепловоза.

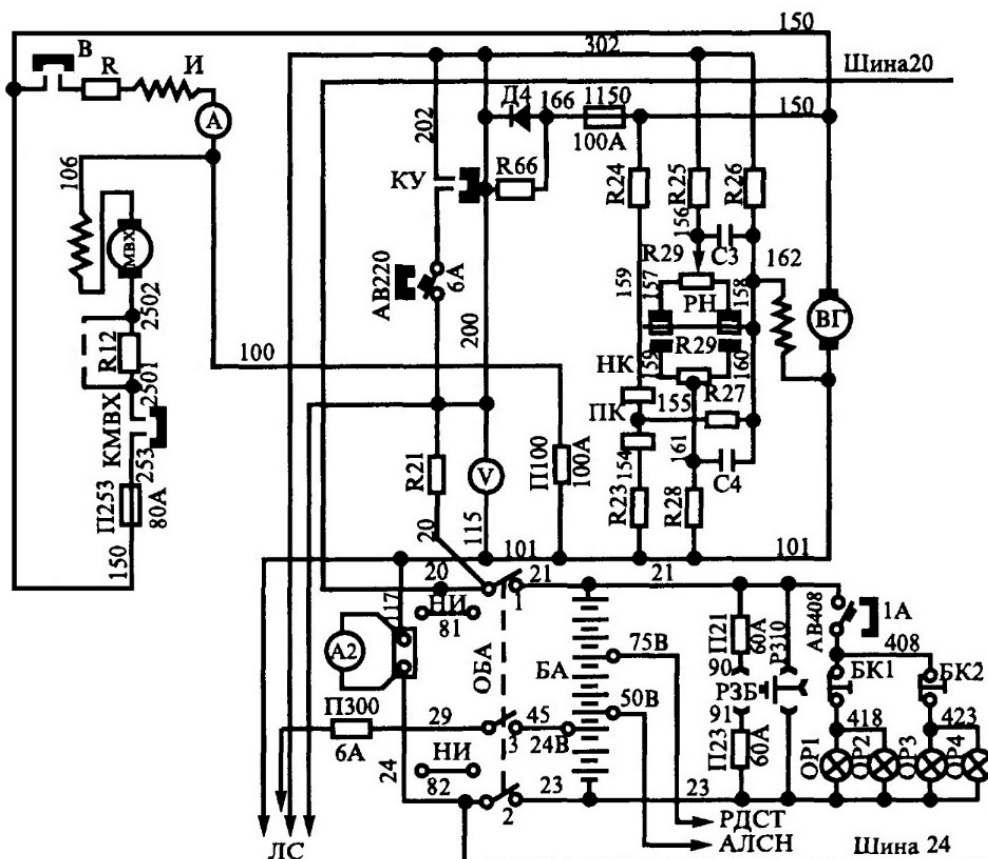


Рисунок 5.2 – Схема подключения обмотки устройства

Испытания проводились на прямом участке звеньевом пути из рельсов типа Р65. Цель испытаний заключалась в сборе показателей для последующей оценки влияния намагничивания зоны контакта колёс с рельсами на тяговые качества локомотива. Методика проведения опытных испытаний заключалась в оценке сцепления колёсной пары локомотива посредством величины тока тягового двигателя и номера позиции контроллера в момент возникновения буксования.

При оценке общей точности замера регистрируемой величины силы тока, каждая из составляющих систематических погрешностей принимает характер случайной величины, а её предельное значение ε становится частной погрешностью. Предельная погрешность измерений силы тока определяется сложением частных погрешностей: от неточности показания амперметра – 3 %, от соединительных проводов – 1 %, от непостоянства напряжения на тяговых двигателях – 3 %

$$\varepsilon = \sqrt{3^2 + 1^2 + 3^2} = 4,36 \text{ \%}.$$

Силовая цепь тепловоза ЧМЭ3 (рисунок 5.3) представлена тяговыми двигателями № 5 и 6, подключёнными последовательно к генератору Г, на время проведения испытаний были отключены тяговые двигатели № 1-4.

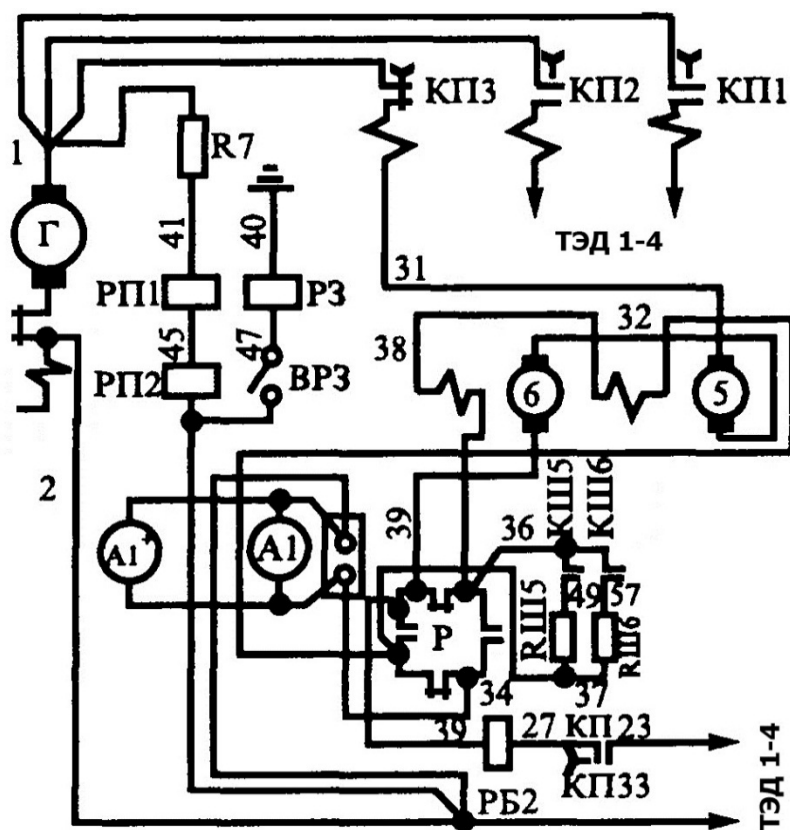


Рисунок 5.3 – Силовая цепь тепловоза ЧМЭ3 при проведении испытаний

Реверсора локомотива развёрнуты в положение «назад», шестая колёсная пара является первой по направлению движения. Для удержания тепловоза 5 на месте и создания сопротивления движению под четыре задние колёсные пары (рисунок 5.4) уложено по одному тормозному башмаку 4 со стороны передних колёсных пар. Перед шестой колёсной парой 1 на рельсы 2 поперёк оси пути уложено индукторное устройство увеличения сцепления колёс с рельсами 3.



Рисунок 5.4 – Схема испытаний (а), подготовительный этап испытаний (б)

Магнитная цепь представлена замкнутым ферромагнитным контуром, состоящим из сердечника с обмоткой, рельсов и колёсной пары тепловоза. Согласно данным журнала ТУ-17 (рисунок 4.17) колёса шестой оси тепловоза имеют прокат 0,5 мм, поверхности катания нового профиля находятся на этапе приработки. В указанных условиях намагничивания индукция магнитного поля в пятнах контакта колёс с рельсами составляет 1 Тл.

Подготовительный этап испытаний включал очистку или смазывание поверхностей катания колёс и рельсов, затормаживание локомотива башмаками с накатом, проверку электрической цепи индуктора. В процессе каждого эксперимента набором позиций контроллера увеличивался ток тяговых двигателей № 5 и 6 до момента срыва сцепления колёсной пары, величина тока начала буксования $I_{\text{ТЭД}}^{\text{Б}}$ фиксировалась по амперметру в кабине локомотива. Каждая серия испытаний включала шесть чередующихся экспериментов без намагничивания и с намагничиванием контакта колёс с рельсами, таблица 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты испытаний тепловоза ЧМЭЗ с индукторным устройством увеличения сцепления колёс с рельсами

Регистрируемые параметры при срыве сцепления				Относительное изм. тока $1 - \frac{I_{\text{ТЭД}}^{\text{Б откл.}}}{I_{\text{ТЭД}}^{\text{Б вкл.}}}$	Абсолютное изм. наибольшей силы тяги $\Delta F_{\text{КП}}$, кН
особенности испытания	усилитель сцепления	поз. контр.	ток $I_{\text{ТЭД}}^{\text{Б}}$, А		
Сухие очищенные поверхности колеса и рельса	отключен	5	970	-0,03	-2,8
	включен	5	940		
	отключен	5	1020	0,05	5,0
	включен	5	1070		
	отключен	5	1000	-0,01	-1,0
	включен	5	990		
Рельсы смочены водой с добавлением мазута	отключен	4	860	0,09	8,2
	включен	5	950		
	отключен	4	820	0,10	8,0
	включен	5	910		
	отключен	4	870	0,11	10,1
	включен	5	980		
Рельсы смочены водой с добавлением мазута. На 4 позиции усилитель сцепления выключается.	1) включен	1-4	-	-	-
	2) выключение на 4 поз.	4	870		

Серии экспериментов выполнялись в два этапа. На первом этапе эксперименты проводились для сухих очищенных поверхностей катания колёс и рельсов. При отключенном устройстве устойчивое сцепление колёс локомотива с рельсами поддерживалось на четвёртой позиции контроллера, а буксование начиналось во время перехода с четвёртой на пятую позицию при токе тяговых двигателей от 940 до 1070 А. Включение устройства не предотвратило буксование при переходе с четвёртой на пятую позицию. Отсутствие эффекта от использования устройства объясняется тем, что увеличение силы тяги во время перехода с четвёртой на пятую позицию превышает прирост сцепления.

На втором этапе рельсы смачивались водой с добавлением мазута. При отключенном устройстве устойчивое сцепление колёс поддерживалось на третьей позиции контроллера, буксование начиналось во время перехода с третьей позиции на четвёртую при токе тяговых двигателей от 820 до 870 А. При включённом устройстве переход с третьей позиции на четвёртую происходил без буксования, на четвёртой позиции контроллера поддерживалось устойчивое сцепление колёс. Последующее выключение устройства сопровождалось срывом сцепления. Увеличение намагничивающей силы устройства в процессе буксования до 16000 А-витков сцепление не стабилизирует. Это объясняется тем, что при начавшемся буксовании коэффициент сцепления колёс с рельсами снижается, намагничивающей силы устройства не достаточно для увеличения сцепления на величину, требуемую для прекращения буксования. В условиях сниженного сцепления предварительное включение устройства позволяет предотвратить развитие буксования, обеспечивает переход на более высокую позицию контроллера (с третьей на четвёртую).

Следует отметить, что получены количественные и качественные показатели, подтверждающие влияние магнитного поля на сцепление колёс с рельсами. Если количественные показатели частично могут быть обусловлены погрешностью ($\approx 5\%$), то качественные показатели обладают большей степенью достоверности. К качественным показателям относятся: увеличение позиции контроллера без буксования при включенном устройстве и срыв сцепления после его выключения.

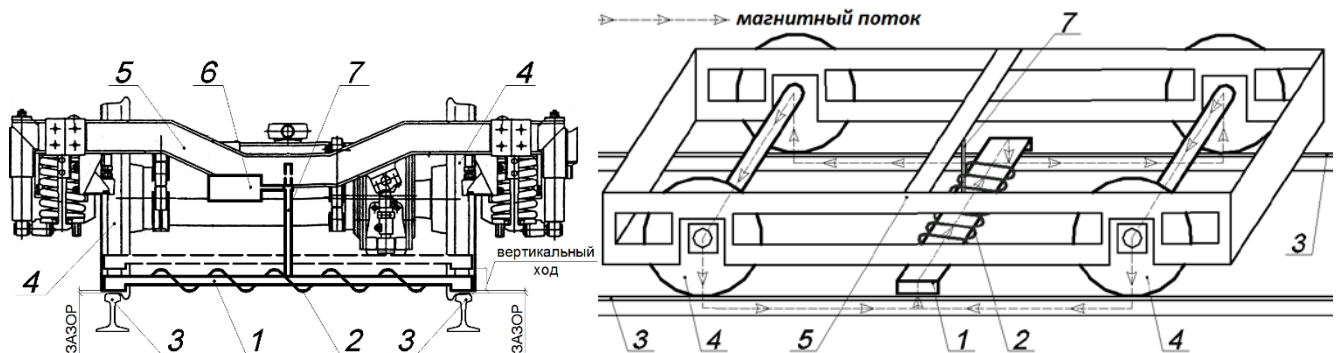
На основе тяговых и токовых характеристик тепловоза ЧМЭЗ получена зависимость силы тяги колёсной пары от тока тягового двигателя при трогании с места $F^{тр}(I_{тэд}) = 0,00003I_{тэд}^2 + 0,04I_{тэд}$. Зависимость близка к линейной, поэтому величина относительного изменения тока близка относительному изменению силы тяги. Тяговые качества тепловоза при использовании усилителя сцепления оцениваются величиной абсолютного изменения наибольшей силы тяги колёсной пары: $\Delta F_{кп} = F^{тр}(I_{тэд}^{Б\text{ вкл.}}) - F^{тр}(I_{тэд}^{Б\text{ откл.}})$. Результаты испытаний показывают, что намагничивание зон контакта колёс с рельсами в условиях сниженного сцепления способствует увеличению наибольшей силы тяги шестой колёсной пары от 9 до 11 % (от 8,2 до 10,1 кН).

На основе полученных результатов определены два направления дальнейшего повышения эффективности устройства увеличения сцепления колёс с рельсами: увеличение размеров устройства, что позволит повысить намагничивающую силу, а также снизить магнитное сопротивление сердечника, и использование систем выявления буксования на ранней стадии развития.

На сегодняшний день основная сложность использования магнитных усилителей коэффициента сцепления колёс с рельсами (МУКС) заключается в отсутствии достаточного опыта создания таких устройств. Можно констатировать, что универсальная конструкция, которая способна существенно повышать сцепные свойства локомотива и отвечать габаритным и компоновочным требованиям экипажа не создана. В работах [109-112, 124] были рассмотрены способы расположения индуктора, являющегося основой МУКС. При расположении обмотки индуктора вдоль оси колёсной пары сталкиваемся с трудностями размещения в габаритах тягового электродвигателя. Располагать обмотку параллельно оси колёсной пары на отдельном сердечнике нецелесообразно, поскольку возникают два дополнительных воздушных зазора между сердечником и дисками колёс, а ось колёсной пары шунтирует контакты колёс с рельсами. При опоясывающем расположении обмотки индуктора вокруг колеса по хорде возникают габаритные ограничения со стороны пути и деталей экипажной части. Крепление индуктора на необрессоренных массах

экипажа приводит к ухудшению условий прочности и надежности обмотки при высоких скоростях.

Расположение индуктора между колёсными парами над рельсами позволяет снизить противоречия, обусловленные внешним габаритными ограничениями. Однако, при креплении индуктора на обрессоренных частях тележки его эффективность снижается вследствие необходимости в обеспечении воздушного зазора между индуктором и рельсом величиной нескольких десятков миллиметров, рисунок 5.5.



1 – магнитопровод; 2 – катушка; 3 – рельсы; 4 – колёса; 5 – рама тележки;
6 – электродвигатель; 7 – немагнитная зубчатая рейка.

Рисунок 5.5 – Схема расположения индуктора между колёсными парами над рельсами

При расположении индуктора в самом колесе возникает необходимость выполнить колесо разрезным, чтобы пропускать значительную часть магнитного потока через контакт колеса и рельса, это приводит к усложнению конструкции. В то же время, учитывая существующий опыт создания мотор-колёс для моторвагонного подвижного состава, нельзя исключать возможность создания для этого вида подвижного состава МУКС с размещением индуктора в колесе. Из перечисленного следует, что МУКС колёс локомотивов с рельсами должны отвечать следующим основным требованиям [109]:

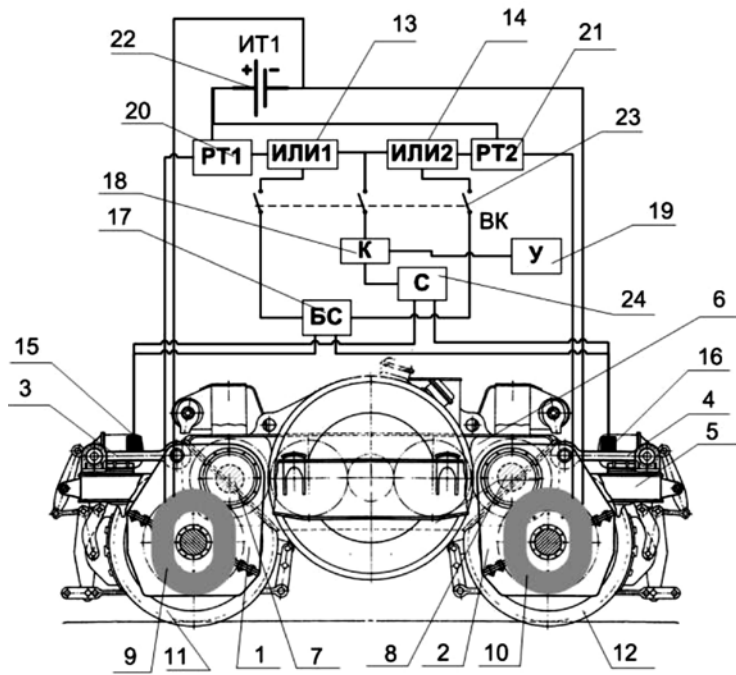
- компоновка должна обеспечивать достаточное пространство для размещения обмотки индуктора;

- в качестве магнитопровода должны быть использованы детали экипажной части;
- в индукторе не должно быть собственных деталей магнитопровода, имеющих большой вес и материалоемкость;
- между магнитопроводом и колесом не должно быть значительного воздушного зазора.

Указанным требованиям в наибольшей степени отвечает компоновка с обмоткой индуктора, размещенной вокруг оси колёсной пары. За счет появления асинхронных тяговых двигателей меньших габаритов и применения зубчатых передач с промежуточными колесами, габаритные ограничения можно считать частично разрешенными. Последующее сравнение магнитных цепей целесообразно выполнять для двух способов расположения обмотки индуктора: на оси колёсной пары и хордового [109].

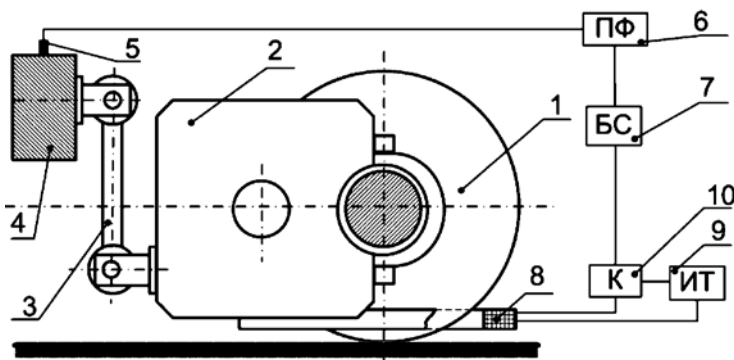
Развитие процесса оснащения локомотивов МУКС возможно двумя путями: модернизация существующих и проектирование новых локомотивов. Для эксплуатируемых локомотивов проблема недостаточного сцепления, как правило, наиболее присуща грузовым магистральным и маневровым локомотивам с опорно-осевым подвешиванием тяговых электродвигателей. Модернизация локомотивов заключается в оснащении тягового электродвигателя индуктором, обмотка которого располагается между моторно-осевыми подшипниками [90]. При данном способе размещения обмотки МУКС ограничения по мощности индуктора будут обусловлены стесненными условиями и мощностью силовой установки автономных локомотивов.

Реализация всех возможностей МУКС требует решения задач конструкционного характера у вновь спроектированных локомотивов. Компоновка привода позволяет получить достаточно свободного места для индукторов, рисунки 5.6-5.8. В полной мере МУКС способен реализовать свои энергосберегающие свойства при работе в паре с групповым тяговым приводом локомотива [109, 111]. Конструкция моноmotorного привода усложняется в случае применения его на трехосных тележках.



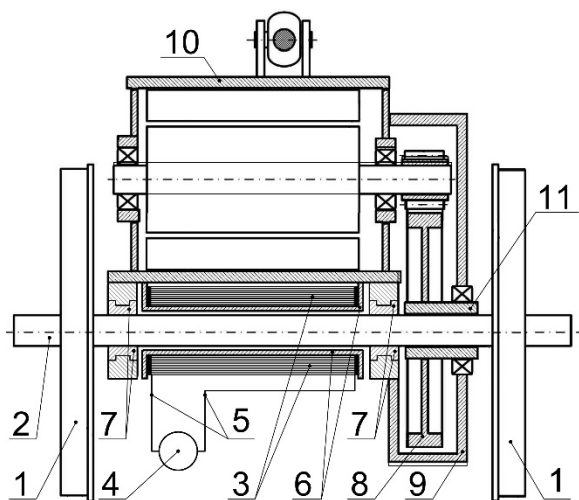
- 1, 2 – осевые редукторы;
 3, 4 – тяги; 5 – рама тележки;
 6 – рамный редуктор;
 7, 8 – карданные валы;
 9, 10 – индукторы; 11, 12 – колёсные пары; 13, 14 – блоки «или»;
 15, 16 – датчики усилия;
 17 – блок сравнения; 18 – ключ;
 19 – блок уставки; 20, 21 – регуляторы тока; 22 – источник тока;
 23 – выключатель; 24 – сумматор

Рисунок 5.6 – Схема тягового привода с осевым расположением индуктора



- 1 – колёсная пара; 2 – ТЭД;
 3 – подвеска; 4 – рама тележки;
 5 – датчик вертикальной виброскорости; 6 – полосовой фильтр;
 7 – блок сравнения, 8 – индуктор;
 9 – источник тока; 10 – ключ.

Рисунок 5.7 – Схема тягового привода с хордовым расположением индуктора



- 1 – колёса; 2 – ось колёсной пары;
 3 – катушка; 4 – источник питания;
 5 – провода; 6 – немагнитный каркас;
 7 – моторно-осевые подшипники;
 8 – зубчатое колесо; 9 – редуктор;
 10 – тяговый электродвигатель;
 11 – немагнитная втулка.

Рисунок 5.8 – Схема тягового привода с осевым расположением индуктора при опорно-осевом подвешивании тягового электродвигателя

В результате обобщения основных конструктивных особенностей МУКС и тягового привода локомотива были поданы заявки и получены патенты РФ [113-122] (приложение Г). Управление МУКС осуществляется системой оперативного регулирования сцепления с обратной связью. Физические процессы, сопровождающие буксование, позволяют выделить основные способы получения информации: возникновение автоколебаний, различие скоростей, изменение тягового усилия, изменение энергии в контакте колеса и рельса путем измерения температуры поверхностей колеса или рельса [124].

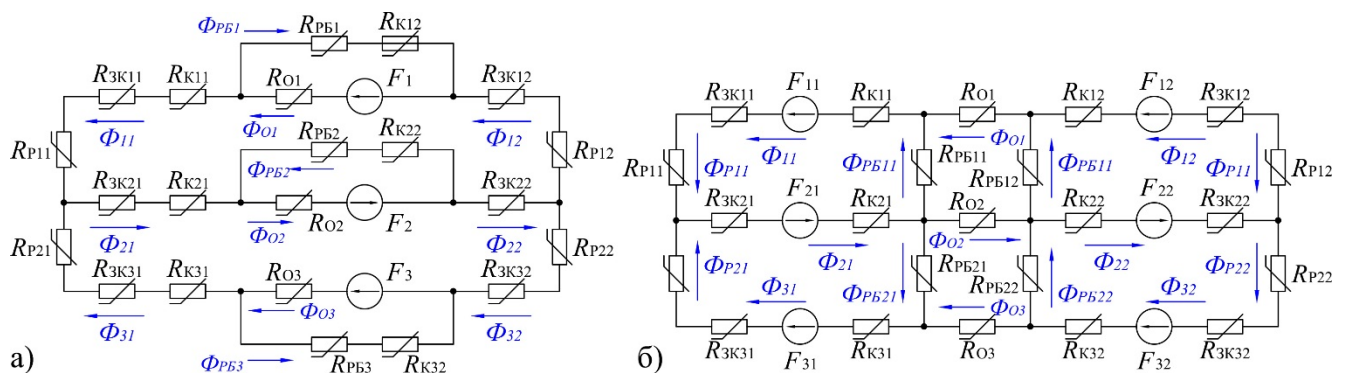
На основе величины мгновенной площади контакта колёс с рельсами система управления МУКС осуществляет плавное регулирование тока индуктора [123]. Заданная МДС индуктора посредством намагничивания зоны контакта позволяет поддерживать коэффициент сцепления колёс локомотива с рельсами в пределах требуемой величины.

Определение площади контакта колёс с рельсами рассмотрено в разделе 4. Поперечное положение колёсной пары система управления определяет исходя из данных о плане железнодорожного пути, пикетажного положения локомотива и скорости следования. В условиях эксплуатации поперечное положение колёсной пары может уточняться путём определения зазора между гребнем колеса и рабочей гранью головки рельса посредством видеосъёмки зоны контакта с последующей кадровой обработкой [176]. Мониторинг поперечного положения колёсной пары в колее способствует формированию данных для системы оперативного регулирования сцепления колеса с рельсом [123, 124].

Наибольшие энергетические потери в механической части тягового привода локомотива приходятся на контакт колёс с рельсами, где реализуется сила тяги [107-110]. Например, при часовом режиме работы электровоза потери от буксования могут превышать 30 % от передаваемой мощности [13, 111]. Применение МУКС сводится к исключению режимов работы тягового привода в условиях буксования. Таким образом, возрастает энергоэффективность работы локомотива с точки зрения энергопотребления, кроме того, снижаются связанные с износом бандажа затраты.

5.2 Магнитная цепь трёхосной тележки тепловоза, оборудованной устройством увеличения сцепления

Устройства для увеличения сцепления ведущих колёс локомотива с рельсами посредством воздействия на зону контакта колеса и рельса магнитного поля предусматривает два типа расположения намагничивающих катушек на трёхосной тележке локомотива: опоясывающее относительно колёс (хордовое) и соосное вдоль осей колёсных пар [90, 113-122]. При соосной намотке каждая катушка располагается вокруг оси между моторно-осевыми подшипниками и вписывается в конструкцию тягового электродвигателя. Зоны контакта колёс с рельсами включаются параллельно источникам МДС и шунтируются буксовыми узлами и рамой тележки, рисунок 5.9 а. Поскольку контакты колёс с рельсами и источники МДС располагаются в замкнутых ферромагнитных контурах, то есть возможность намагнитить зоны контакта крайних колёсных пар до индукции 1 Тл, а средней колёсной пары до 1,5 Тл, рисунок 5.10 а. Для указанного режима МДС одного индуктора составляет 6000 А-витков, а его мощность – 31 кВт [90].



F_1, F_2, F_3 – источники МДС на осях колёсных пар; $F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{21}, F_{22}, F_{23}$ – источники МДС вокруг колёс; Φ – магнитный поток; R – магнитное сопротивление;

ЗК – зона контакта колеса с рельсом, К – колесо; О – ось колёсной пары;

Р – рельс; РБ – рама тележки и буксовый узел

Рисунок 5.9 – Схемы замещения магнитной цепи трёхосной тележки тепловоза при расположении катушек на осях колёсных пар (а), при опоясывающем расположении катушек вокруг колёс (б)

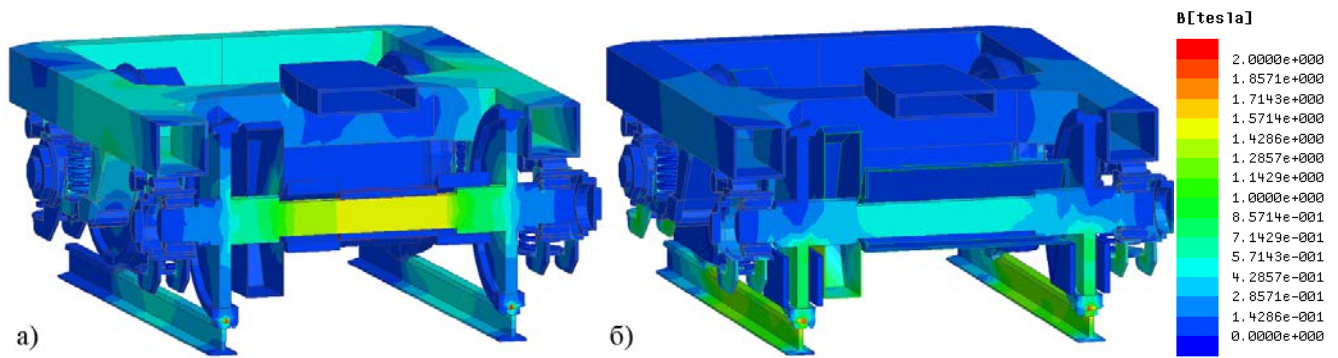


Рисунок 5.10 – Концентрация магнитного поля при расположении катушек на осях колёсных пар (а), при опоясывающем расположении катушек вокруг колёс (б) (выполнен разрез по оси второй колёсной пары)

При опоясывающем расположении катушки обмотка наматывается в непосредственной близости от зоны контакта колеса с рельсом. Это позволяет включить контакт колеса с рельсом последовательно с источником МДС (рисунок 5.9 б) и пропускать основной магнитный поток через зону контакта, рисунок 5.10 б. С эксплуатационной точки зрения создаются сложности осмотра колес. Катушки крепятся к корпусу буксы, корпусу тягового двигателя (кожуху редуктора) на высоте 100 мм над уровнем головки рельса. Толщина намотки составляет от 20 до 25 мм и ограничивается зазорами между колесом, корпусом тягового двигателя (кожухом редуктора). Такое расположение катушки позволяет отнести индуктор к обрессоренным частям тележки и вписать его в габарит подвижного состава, проходящего по механизированным сортировочным горкам при нерабочем положении замедлителей. Для насыщения зон контакта потребная МДС одного индуктора составляет 6000 А-витков, а его мощность – 97 кВт [90].

Во время разгона локомотива осуществляется кратковременное намагничивание зон контакта наиболее склонных к буксованию колёсных пар, намагничивание может осуществляться при любом расположении катушек. Эксплуатация железнодорожного подвижного состава показывает, что в первую очередь срыв сцепления происходит у первой по ходу колёсной пары, после чего последовательно срываются в разносное буксование другие колёсные пары.

Расположение обмотки на оси энергетически более выгодно. Во-первых, катушка на оси более компактна, диаметр оси значительно меньше размеров колеса. Средняя длина одного витка вокруг оси составляет 0,6 м, а у колеса – 2 м, при равном числе витков уменьшается длина намотки и мощность катушки. Во-вторых, при расположении катушек на осях колёсных пар, их потребное число сокращается в два раза по сравнению с опоясывающим расположением вокруг колёс [90].

Основная причина снижения эффективности магниторельсовых систем заключается в отрыве от рельса магнитного блока [177]. Отрыв сопровождается увеличением магнитного сопротивления и ослаблением потока, указанный недостаток отсутствует в рассматриваемых МУКС, рисунок 5.9. Поскольку колёса плотно прижаты к рельсам, то существуют постоянно замкнутые ферромагнитные контуры: первая колёсная пара – левый рельс – вторая колёсная пара – правый рельс; третья колёсная пара – левый рельс – вторая колёсная пара – правый рельс. Таким образом, зоны контакта второй колёсной пары могут намагничиваться от трёх источников, а первой и третьей – от двух [90].

Повышение сцепных свойств трёхосной тележки локомотива может вестись тремя или двумя индукторами. Намагничивание всех колёсных пар тележки тремя индукторами суммарной мощностью 93 кВт позволяет увеличить сцепление средней колёсной пары до 22 %, а крайних колёсных пар тележки до 7 %. Отключение одного индуктора и намагничивание двух смежных колёсных пар тележки двумя индукторами суммарной МДС 14800 А-витков, позволяет сократить протяжённость магнитной цепи, а высвобождаемую мощность задействовать для большего намагничивания зон контакта крайней колёсной пары. В указанном режиме удаётся повысить сцепление двух смежных колёсных пар тележки на 11 %. Для прироста сцепления до 22 %, на крайних колёсных парах тележки следует прибегнуть к опоясывающему расположению катушек относительно колёс [90].

Рассмотренные устройства могут использоваться и на подвижном составе с двухосными тележками, при этом магнитная цепь упростится, а намагничивание будет проводиться аналогично трёхосной тележке по схеме использования двух индукторов.

5.3 Режимы работы индукторов на шестиосном маневровом тепловозе

Выше было показано, что энергетически выгодно осевое расположение индуктора, это особенно актуально для автономных локомотивов, когда нет возможности потреблять дополнительную мощность извне. При трогании и разгоне локомотива из-за ограничения по сцеплению возникает недоиспользование его тяговой мощности ΔP . Если часть этой мощности направлять на намагничивание наиболее склонных к буксованию колёсных пар, то прирост сцепления позволит локомотиву развивать большую силу тяги и повысить энергоэффективность работы тягового привода [13, 90, 107-112].

Для тепловоза ЧМЭЗ рассчитаны режимы работы МУКС с осевым расположением индукторов. Энергетические затраты на две тележки составляют от 186 до 500 кВт. На рисунке 5.11 построены графики изменения недоиспользуемой тяговой мощности $\Delta P(v, \psi)$ при реализации локомотивом наибольшей силы тяги по условиям сцепления. Следует отметить, что недоиспользованная тяговая мощность – величина переменная, уменьшается с ростом скорости v и коэффициента сцепления ψ [125].

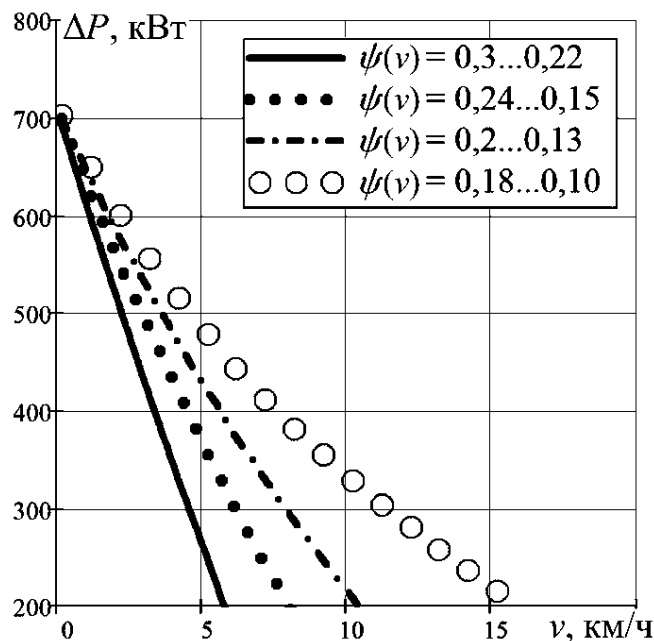


Рисунок 5.11 – Недоиспользованная тяговая мощность тепловоза ЧМЭЗ при реализации наибольшей силы тяги по условиям сцепления (все индукторы отключены, значения коэффициента сцепления при трогании: 0,18; 0,2; 0,24; 0,3)

Принято три режима работы МУКС: 1-й режим – работают все шесть индукторов; 2-й режим – работают по два индуктора на каждой тележке; 3-й режим – работают по два индуктора на каждой тележке с кратковременным протеканием значительных токов. Неиспользованная тяговая мощность тепловоза расходуется на работу индукторов по намагничиванию наиболее склонных к буксованию колёсных пар N_M и реализацию прироста силы тяги ΔF , $\Delta P(v, \psi) = N_M + \Delta F \cdot v$.

При трогании с места резерв мощности принимает наибольшее значение $\Delta P_{max}=700$ кВт, что позволяет задействовать 3-й режим кратковременного намагничивания с протеканием по обмоткам индукторов токов, превышающих номинальный в 2-2,5 раза. Суммарная мощность двух индукторов одной тележки составляет 250 кВт, а их МДС – 24000 А-витков. Это позволяет при трогании с места двумя индукторами намагнитить зоны контакта четырёх колёс каждой тележки до индукции 1,33 Тл и повысить сцепление двух смежных колёсных пар тележки на 14 %, при этом не требуется увеличивать число витков катушки. Значения для второй тележки аналогичны. Прирост силы тяги тепловоза зависит от величины исходного коэффициента сцепления без намагничивания [125], рисунок 5.12.

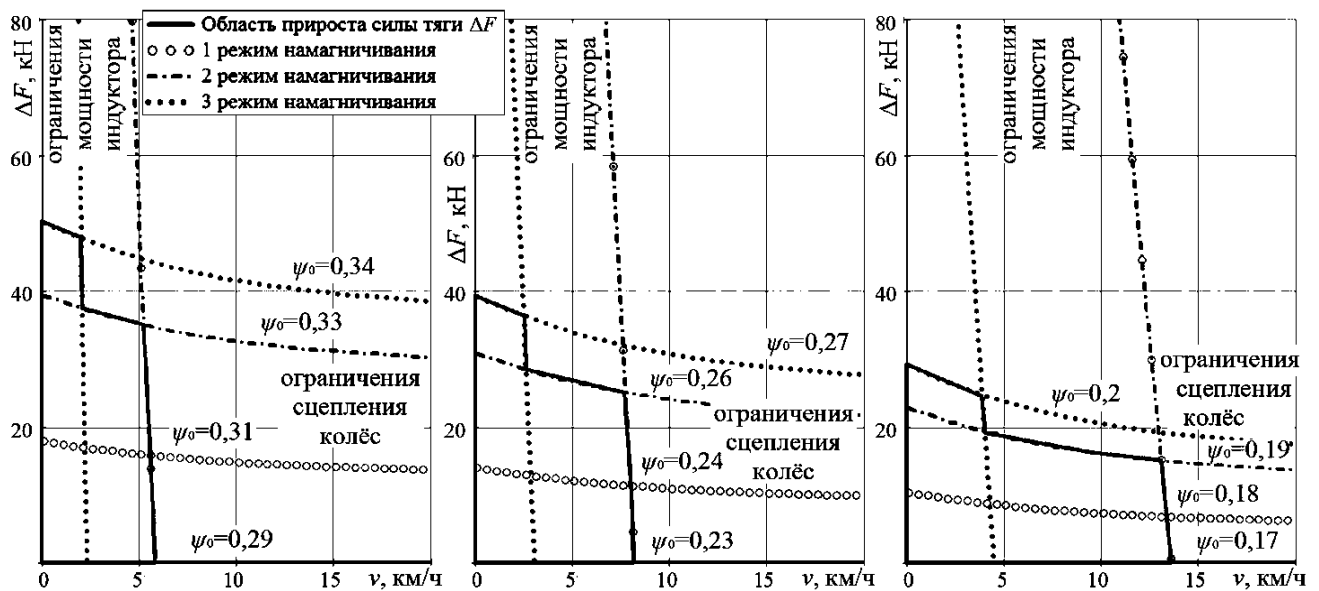


Рисунок 5.12 – Формирование области прироста тяговых сил тепловоза ЧМЭЗ по условиям ограничения сцепления и мощности индуктора (значения коэффициента сцепления при трогании с выключенными индукторами: 0,29; 0,23; 0,17)

Расчёты показывают, что при трогании с места с включенными индукторами прирост тяговых сил четырёх наиболее склонных к буксованию осей тепловоза ЧМЭЗ составляет от 30 до 50 кН, т.е. на одну ось в среднем приходится от 7,5 до 12,5 кН. Результаты испытания показывают, что при трогании с места в условиях сниженного сцепления намагничивание зон контакта колёс тепловоза ЧМЭЗ с рельсами способствует увеличению наибольшей силы тяги шестой колёсной пары на величину от 8,2 до 10,1 кН. Расхождение расчётных и опытных результатов находится в пределах от 9 до 19 %.

Из области прироста тяговых сил тепловоза ЧМЭЗ (рисунок 5.12) видно, что по мере разгона прирост силы тяги ΔF снижается до 18-22 кН. Для случая повышения коэффициента сцепления с 0,29 до 0,34 после разгона до 2 км/ч недоиспользуемая тяговая мощность рассчитывается выражением следующего вида: $\Delta P = (250 + 250) \text{ кВт} + 48 \text{ кН} \cdot 2 \text{ км/ч} = 530 \text{ кВт}$. Эта величина является предельной по условиям ограничения мощности. Появляется необходимость перейти на менее энергоёмкий 2-й режим работы индукторов, с коэффициентом сцепления $\psi=0,33$ [125].

Плавное регулирование тока индуктора осуществляет система оперативного регулирования сцепления колеса с рельсом. Выключение индукторов происходит после разгона локомотива до скорости, не допускающей возникновения буксования. 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 локомотива ЧМЭЗ. Данный факт подтверждает эксплуатационную эффективность использования МУКС особенно на участках, где коэффициент сцепления систематически снижен (кривые малого радиуса, пути для наливных грузов и т.д.). Поскольку пятно контакта между колесом и рельсом является основным источником энергетических потерь в механической части привода, то улучшение сцепных свойств локомотива способствует повышению энергетической эффективности тягового комплекса.

5.4 Выводы по разделу 5

1. Оснащение локомотивов МУКС целесообразно выполнять с использованием осевого или опоясывающего (хордового) способа расположения обмотки индуктора. Осевое расположение индуктора энергетически более выгодно.
2. При осевом расположении катушек повышение сцепных свойств трёхосной тележки локомотива может вестись тремя или двумя индукторами. Для тележек локомотива ЧМЭЗ намагничивание зон контакта наиболее склонных к буксованию колёсных пар целесообразно выполнять двумя индукторами. Сцепление двух смежных колёсных пар тележки увеличивается на 14 %, прирост силы тяги шестиосного маневрового локомотива при трогании с места составляет от 30 до 50 кН, по мере разгона снижается до 18-22 кН.
3. Результаты исследований показывают, что МУКС способны к улучшению тяговых качеств локомотивов на величину от 9 до 11 %. Полная реализация всех возможностей МУКС возможна при решении ряда задач, которые в перспективе окажут влияние на конструкцию тяговых приводов. Для устранения шунтирующего действия от элементов тележки и повышения эффективности устройства требуется обеспечить магнитную изоляцию колёсных пар от тележки.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иньков, Ю.М. Выбор параметров двухсистемного грузового электровоза [Текст] / Ю.М. Иньков, В.В. Литовченко, Д.В. Назаров, В.П. Феоктистов // Мир транспорта. – 2014. – №6. – С. 34-46. – ISSN 1992-3252.
2. Исаев, И.П. Случайные факторы и коэффициенты сцепления [Текст] / И.П. Исаев – М. : Транспорт, 1970. – 184 с.
3. Лужнов, Ю.М. Нанотрибология сцепления колес с рельсами: реальность и возможности [Текст] / Ю.М. Лужнов. – М. : Интекст, 2009. – 176 с.
4. Исаев, И.П. Проблемы сцепления колес локомотива с рельсами [Текст] / И.П. Исаев; Ю.М. Лужнов – М. : Машиностроение, 1985. – 238 с.
5. Лужнов, Ю.М. Сцепление колес с рельсами. Природа и закономерности [Текст] / Ю.М. Лужнов. – М. : Интекст, 2003. – 144 с.
6. Лужнов, Ю.М. Модель фрикционного контакта колеса с рельсом и возможности управления его свойствами [Текст] / Ю.М. Лужнов, В.А. Попов, Г.М. Седов // Вестник ВНИИЖТ. – 2009. – №1. – С. 30-32.
7. Способ повышения сцепления колес транспортного средства с рельсами [Текст] : пат. 2395418 Рос. Федерация : МПК В61С15/08 / Лужнов Ю.М. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ОАО «Науч.-исслед. ин-т ж.д. транспорта». – № 2008132737/11 ; заявл. 08.08.2008 ; опубл. 27.07.2010, Бюл. № 21. - 8 с: ил.
8. Самме, Г.В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами [Текст] : монография / Г.В. Самме. – М. : Маршрут, 2005. – 80 с. – ISBN 5-89035-221-0.
9. Kalker, J.J. Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact / J.J. Kalker. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers. – 1990.
10. Kalker, J.J. Wheel-rail wear calculations with the program CONTACT / J.J. Kalker // in G.M.L. Gladwell, H. Ghonen and J. Kalonsek (eds.), Proc. Int. Symp. on Contact Mechanics and Wear of Rail-Wiieel Systems II, Kingston, RI, Jidy 1986.. – Waterloo Ontario : University of Waterloo Press, 1987. – pp. 3-26.
11. Лужнов, Ю.М. Влияние магнитного поля на механизм взаимодействия колес и рельсов [Текст] / Ю.М. Лужнов, А.П. Прунцев // Тр. МИИТ. – Вып. 480. – 1975.

12. Керопян, А.М. Развитие теории взаимодействия и обоснование рациональных параметров системы колесо - рельс карьерных локомотивов в режиме тяги : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.06 / Керопян Амбарцум Мкртичевич. – Екатеринбург, 2015. – 233 с.
13. 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. Воробьёв, 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.
14. Крагельский, И.В. Молекулярно-механическая теория трения [Текст] / И.В. Крагельский // Трение и износ в машинах: труды второй Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах : АН СССР, 1949. – Т. III.
15. Крагельский, И.В. Развитие науки о трении [Текст] / И.В. Крагельский, В.С Щедров. – М. : изд-во АН СССР, 1956. – 237 с.
16. Крагельский, И.В. Трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1968. – 480с.
17. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (износ и безызносность) [Текст] : Учебник / Д.Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : «Издательство МСХА», 2001. – 616 с., ил. 208. – ISBN 5-94327-004-3.
18. Демкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин [Текст] / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М. : Машиностроение, 1981. – 244 с.
19. Фридман, Я.Б. Деформация и разрушение [Текст] / Я.Б. Фридман. – изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1974. – 472 с. с ил. (Механические свойства металлов : в двух частях. / Я.Б. Фридман ; часть первая).
20. Дерягин, Б.В. Что такое трение? [Текст] / Б.В. Дерягин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 232 с.
21. Лужнов, Ю.М. Влияние постоянного магнитного поля на трение твёрдых тел [Текст] / Ю.М. Лужнов, А.П. Прунцев // Тр. МИИТ. – Вып. 467. – 1974. – 245 с.
22. Лужнов, Ю.М. Основы триботехники [Текст] : учеб. пособие / Ю.М. Лужнов, В.Д. Александров; под ред. Ю.М. Лужнова. – М. : МАДИ, 2013. – 136 с.

23. Горячева, И.Г. Механка фрикционного взаимодействия [Текст] / И.Г. Горячева. – М. : Наука, 2001. – 478 с. – ISBN 5-02-002567-4.
24. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения [Текст] / А.С. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963. – с. 427.
25. Постников, С.Н. Некоторые физические аспекты магнитной обработки инструмента [Текст] / С.Н. Постников, А.Ф. Годлина, В.Н. Тараканов // Вопросы электрофизики трения и обработки резанием: Труды Горьковского политехнического института им. А.А.Жданова. – Горький : ГПИ, 1974. – Вып. 4. – С. 27-35.
26. Постников, С.Н. Электрические явления при трении и резании [Текст] / С.Н. Постников. – Горький : Волго-Вятское кн. изд-во, 1975. – 280 с.
27. Якунин, Г.И. Влияние намагниченности резца и заготовки на стойкость [Текст] / Г.И. Якунин, Э.А. Умаров [и др.] // Ташкентский политехнический институт. Сер. Машиностроение, 40 : изд-во «ФАН», 1966. – С. 18-24.
28. Якунин, Г.И. Исследование новых эффектов, связанных с термоэлектрическими явлениями и влияющими на стойкость быстрорежущих резцов. Электрические явления при трении и резании металлов. [Текст] / Г.И. Якунин, Н.Г. Молчанова. – М. : Изд-во Наука, 1969. – С. 49-55.
29. Боуден, Ф.П. Трение и смазка твердых тел [Текст] / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор ; пер. с англ. Н.М. Михина и А.А. Силина, под ред. д-ра техн. наук И.В. Крагельского. – М. : Машиностроение, 1968.
30. Косов, В.С. Применение программного комплекса «Универсальный механизм при создании рельсового подвижного состава [Текст] / В.С. Косов, Г.С. Михальченко, Д.Ю. Погорелов, А.В. Спиров // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2005. – №8 (90). – С. 45-48.
31. Минов, Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей [Текст] / Д.К. Минов. – М : Транспорт, 1965. – 267 с.
32. Pogorelov, D.Y. Simulation of Rail Vehicle Dynamics with Universal Mechanism Software / D.Yu. Pogorelov // A. Sladkowski (Ed.) Rail Vehicle Dynamics and Associated Problems. – Gliwice, 2005. – P.13-58.

33. Погорелов, Д.Ю. Методы моделирования динамики железнодорожных колесных пар с учетом упругости в программном комплексе «Универсальный механизм» / Д.Ю. Погорелов, Г.В. Михеев, С.Б. Томашевский, А.Н. Родиков // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ: III научно-технический семинар, г. Брянск, 6-7 апреля 2016 г. [Текст]+[Электронный ресурс]: сб. тез. / под ред. Д.Ю. Погорелова. – Брянск: БГТУ, 2016. – С. 57-59. – ISBN 978-5-89838-885-0.
34. Woog, P. Contribution a l'etude de graissage. Onctuosite. Influences moleculaires. – Paris. – 1926.
35. Горячева, И.Г. Контактные задачи в трибологии [Текст] / И.Г. Горячева, М.Н. Добычин. – М. : Машиностроение, 1988. – 256 с. : ил. – ISBN 5-217-00208-5.
36. Greenwood, J.A. Contact of nominally flat surfaces / J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. – 1966. – V. 295. – P. 300-319.
37. Михин, Н.М. Внешнее трение твёрдых тел [Текст] / Н.М. Михин. – М. : Наука, 1977. – С. 53-56.
38. Комбалов, В.С. Влияние шероховатости твёрдых тел на трение и износ [Текст] / В.С. Комбалов. – М. : Наука, 1974. – 112 с.
39. Аргатов, И.И. Основы теории упругого дискретного контакта [Текст] : Учебное пособие / И.И. Аргатов. – СПб. : Политехника, 2003. – 233 с. : ил. – ISBN 5-7325-0744-2.
40. Попов, В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений [Текст] / В.Л. Попов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 352 с. – ISBN 978-5-9221-1443-1.
41. Тихомиров, В.П. Методы моделирования процессов в триботехнических системах [Текст] / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, В.В. Порошин. – М. : МГИУ, 2004. – 292 с.
42. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [Текст]. – М. : Трансинфо ЛТД, 2011. – 256 с. – ISBN 978-5-93647-021-9.
43. Лысюк, В.С. Причины и механизм схода колеса с рельса. Проблема износа колес и рельсов. [Текст] / В.С. Лысюк. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Транспорт, 2002. – 215 с. – ISBN 5-277-02281-3.

44. Бабат, Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение [Текст] / Г.И. Бабат. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.-Л. : Энергия, 1965. – 552 с.
45. Йех, Я. Термическая обработка стали [Текст] : справочник / Я. Йех; под ред.: Ю.Г. Андреева, В.Б. Фридмана ; пер. с чеш. И.А. Грязновой. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Металлургия, 1979. – 264 с.
46. Ковреев, Г.С. Электроконтактный нагрев при обработке цветных металлов [Текст] / Г.С. Ковреев. – М. : Металлургия, 1975. – 312 с.
47. Гаврилов, Г.М. Изменение свойств закаленной стали в магнитном поле [Текст] / Г.М. Гаврилов // Физика металлов и металловедение. – 1977. – № 6. – С. 18-20.
48. Кривоглаз, М.А. Закалка стали в магнитном поле [Текст] / М.А. Кривоглаз, В.Д. Садовский, Л.В. Смирнов, Е.А. Фокина. – М. : Наука, 1977. – 120 с.
49. Тарасов, А.А. Повышение износостойкости конструкционных, инструментальных сталей и чугунов магнитной обработкой : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.04 / Тарасов Анатолий Андреевич. – М., 1984. – 160 с.
50. Герберт, Е. Изменение твёрдости металлов и стабилизация этой твёрдости под действием магнетизма [Текст] / Е. Герберт // Специальное машиностроение. – 1932. – № 4. – С. 13.
51. Галей, М.Т. Повышение стойкости режущих инструментов путём магнитной обработки [Текст] / М.Т. Галей // Станки и инструмент. – 1973. – №5. – С. 31.
52. Галей, М.Т. Некоторые особенности эксплуатации намагниченного режущего инструмента. Магнитная обработка режущего инструмента и перспективы дальнейшего развития этого метода [Текст] / М.Т. Галей. – М., 1978. – С. 18-20.
53. Макаров, А.Д. Опыт внедрения магнитной обработки режущего инструмента на Уфимском моторостроительном заводе. Магнитная обработка режущего инструмента и перспективы дальнейшего развития этого метода [Текст] / А.Д. Макаров, Ю.М. Кичко, С.А. Шустов. – М., 1978.
54. Постников, С.Н. Субструктурное упрочнение быстрорежущей стали в импульсных магнитных полях [Текст] / С.Н. Постников, А.В. Иляхинский // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Механика деформируемых систем. Все-союзн. межвуз. сб. : Горьковский ун-т, 1979. – С. 143-149.

55. Постников, С.Н. О влиянии внешнего магнитного поля на дислокационные образования в твёрдых телах [Текст] / С. Н. Постников, В.П. Сидоров // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности. Всесоюзн. межвуз. сб. : Горьковский ун-т, 1980. – С. 165-168.
56. Постников, С.Н. Об одной из причин повышения стойкости быстрорежущего инструмента, подвергнутого магнитной обработке [Текст] / С. Н. Постников, А.Д. Кунгин // В кн. Оптимизация процессов резания жаро-особопрочных материалов. Межвуз. научн. сб. : Уфимск. авиац. ин-т, 1980. – Вып. 5. – С. 157-160.
57. Бородкин, Ю.А. О стойкостных зависимостях свёрл, подвергнутых магнитной обработке [Текст] / Ю.А. Бородкин, В.А. Курбатов, А.Е. Силуанов, В.Н. Ткачук // В кн. Вопросы электрофизики трения и обработки резанием. «Труды Горьковского политехн. ин-та им. А.А. Жданова». – 1974.
58. Малыгин, Б.В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин [Текст] / Б.В. Малыгин. – М. : Машиностроение, 1989. – 112 с.
59. Физический энциклопедический словарь. / Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д.М. Алексеев, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др. — М.: Сов. энциклопедия, 1984. — 944с., ил., 2л цв. ил.
60. Sondheimer, E.H. The Theory of the Galvanomagnetic and Thermomagnetic Effects in Metals / E.H. Sondheimer // Proceedings of the Royal Society A. – July 21, 1948. – №193. – pp. 484-512.
61. Альшиц, В.И. О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля [Текст] / В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Т.М. Перекалина // Физика твердого тела. – 1987. – Т. 29. – № 2. – С. 467-471.
62. Alshits, V.I. Dislocation kinetics in nonmagnetic crystals: a look through a magnetic window / V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, M.V. Koldaeva, R.K. Kotowski, E.A. Petrzhik, P. Tronczyk // Phys. Usp. 60. – 2017. – P. 327-341. – DOI: 10.3367/UFNe.2016.07. 037869.
63. Урусовская, А.А. Макроскопический магнитопластический эффект в кристаллах NaCl [Текст] / А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккавер // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 1998. – Т.3 – №3. – С. 213-215.

64. Hayashi, S. Magneto-plastic effect in nickel single crystals / S. Hayashi, S. Takahashi, M. Yamamoto // J. Phys. Soc. – Japan. – 1971. – V. 30. – №2. – P. 381-387.
65. Hayashi, S. Direct observation of the dislocation motion in ferromagnetic crystals under alternating magnetic fields / S. Hayashi // Jap. J. Appl. Phys. – 1973. – V. 12. – № 2. – P. 182-185.
66. Reiter, G. Physics of Sliding Friction / G. Reiter et al. // Applied Sciences. – Vol. 311. – Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. – 1996. – p. 119.
67. Головин, Ю.И. Магнитопластические эффекты в кристаллах [Текст] / Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов // Известия РАН (сер. физическая). – 1997. – Т. 61. – №5. – С. 850-859.
68. Golovin, Y.I. Magnetoplastic effects in solids / Yu.I. Golovin // Physics of the Solid State. – 2004. – Т. 46. № 5. – P. 789-824.
69. Коновалов, С.В. Прочность и пластичность металлов при слабых электрических воздействиях [Текст] : монография / С.В. Коновалов, Р.А. Филиппев, О.А. Столбоушкина [и др.]. – Новокузнецк : Изд-во ОАО «Новокузнецкий полиграфический комбинат», 2009. – 180 с.
70. Столбоушкина, А.О. Структурно-фазовые состояния и дислокационная субструктура Al при ползучести [Текст] : монография / О.А. Столбоушкина, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк : Изд-во ОАО «Новокузнецкий полиграфический комбинат», 2010. – 182 с.
71. Иванов, Ю.Ф. Физические основы повышения усталостной долговечности нержавеющей сталей [Текст] : монография / Ю.Ф. Иванов, С.В. Воробьев, С.В. Коновалов [и др.]. – Новокузнецк : Изд-во «Интер-Кузбасс», 2011. – 302 с.
72. Коновалов, С.В. Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов [Текст] : монография / С.В. Коновалов, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов. – Новокузнецк : Изд-во «Интер-Кузбасс», 2013. – 293 с.
73. Филиппев, Р.А. Изменение параметров пластической деформации при влиянии внешних энергетических воздействий [Текст] / Р.А. Филиппев, Д.В. Загуляев, О.А. Столбоушкина [и др.] // X Международная научно-техническая Уральская

школа-семинар металловедов – молодых ученых, Екатеринбург, 7-11 декабря 2009 г. – Екатеринбург, 2009. – С. 275-276.

74. Громов, В.Е. Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий [Текст] : научно-справочное издание / В.Е. Громов. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2014. – 133 с.

75. Лебедев, В.П. Электронное торможение дислокаций в алюминии в магнитном поле [Текст] / В.П. Лебедев, В.С. Крыловский // Физика твердого тела. – 1985. – т. 27, 5 – С. 1285-1290.

76. Salikhov, K.M. Spin Polarization and Magnetic Effects in Radical Reactions / K.M. Salikhov, Yu.N. Molin, A.L. Buchachenko, R.Z. Sagdeev // Elsevier. – Amsterdam. – 1984.

77. Головин, Ю.И. Влияние постоянного магнитного поля на скорость пластического течения монокристаллов NaCl:Ca [Текст] / Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов // Физика твёрдого тела. – 1995. – Т. 37. – Вып. 7. – С. 2118-2121.

78. Баткилин, Я.М. Особенности упрочнения меди при магнитно-импульсной обработке [Текст] / Я.М. Баткилин, А.В. Легеза // Вестник Харьковского политехнического института. – 1974. – № 94. – Вып. 2. – 53 с.

79. Стрижало, В.А. Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях [Текст] / В.А. Стрижало, Л.С. Новогрудский, Е.В. Воробьев. – К. : Наукова думка, 1990. – 160 с.

80. Головин, Ю.И. Магнитопластичность твердых тел [Текст] / Ю.И. Головин // Физика твёрдого тела. – 2004. – Т. 46. – Вып. 5. – С. 769-803.

81. Startsev, V.I. In: Dislocations in Solids / V.I. Startsev; Ed. by F.R.N. Nabarro. – North Holland, Amsterdam. – 1983. – Vol. 6. – P. 143.

82. Kaganov, M.I. Galvano-magnetic Phenomena Today and Forty Years Ago / M.I. Kaganov, V.G. Peschansky // Elsevier. – 2002.

83. Комшина, А.В. Перспективность метода низкоэнергетической обработки материалов с использованием магнитного поля [Текст] / А.В. Комшина, А.С. Помельникова // «Наука и образование». : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – С. 463-488.

84. Воробьёв, Д.В. Приближённая оценка параметров контактирования шара с шероховатой поверхностью [Текст] / Д.В. Воробьёв // Вестник БГТУ. – 2004. – №4. – С. 48-53.
85. Воробьёв, Д.В. Трибологические характеристики металлических пар при воздействии на контакт электрического и магнитного полей [Текст] / Д.В. Воробьёв, В.П. Тихомиров, А.И. Ивахин // Вестник БГТУ. – 2005. – №2. – С. 33-36.
86. Воробьёв, Д.В. Моделирование сцепления колеса с рельсом при помощи одношарикового трибометра [Текст] / Д.В. Воробьёв, В.Д. Шаров // Научный информационный сборник ВИНТИ, РАН. Транспорт: Наука, техника управление. – 2004. – №12. – С. 29-32.
87. Воробьёв, Д.В. Управление процессом сцепления колеса с рельсом путем воздействия на контакт электрического тока и магнитного поля [Текст] / Д.В. Воробьёв, В.П. Тихомиров, Г.В. Багров, В.С. Мицкович // Вестник БГТУ. – 2006. – №1 (9). – С. 10-14.
88. Способ холодной прокатки полос [Текст] : пат. 2264873 Рос. Федерация : МПК В21В1/28 / Делюсто Л.Г. ; заявитель и патентообладатель Делюсто Л.Г. – № 2004103061/02 ; заявл. 27.04.2008 ; опубл. 10.07.2005, Бюл. № 21.
89. Делюсто, Л.Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях [Текст] / Л.Г. Делюсто. – М. : Машиностроение, 2005. – 272 с. : ил. – ISBN 5-217-03307-X.
90. Космодамианский, А.С. Увеличение сцепления колес локомотива с рельсами воздействием постоянных магнитных полей на зону контакта [Текст] / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьёв, В.О. Корчагин // Наука и техника транспорта. – 2017. – №2. – С. 8–15. – ISSN 2074-9325.
91. Кравець, І.А. До гіпотези про стан вузла тертя в магнітному полі [Текст] / І.А. Кравець, М.М. Свирид, О.М. Белас, Г.А. Волосович, В.М. Бородій // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2011. – Вип. 56. – С. 33-44.
92. Спосіб відновлення поверхні тертя [Текст] : пат. 36601, України : МПК G01N 3/56 / Свирид М.М., Кравець І.А., Занько С.М., Паращанов В.Г., Задніпровська С.М. – № u200809664 ; заявл. 23.07.2008 ; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 20.

93. Кочергин, К.А. Контактная сварка [Текст] / К.А. Кочергин. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 240с.
94. 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. Роголёва. – Брянск : БГТУ, 2015. – С. 225-227. – ISBN 978-5-89838-807-2.
95. Рельсовый модификатор трения [Текст] : пат. 2170756 Рос. Федерация : МПК С10М169/04 / Шаповалов В.В., Щербак П.Н. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Шаповалов В.В. – № 2000102501/04 ; заявл. 01.02.2000 ; опубл. 20.07.2001.
96. Модификатор трения [Текст] : пат. 2238304 Рос. Федерация : МПК С10М169/04 / Шаповалов В.В., Могилевский В.А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Шаповалов В.В. – № 2003103713/04 ; заявл. 07.02.2003 ; опубл. 20.10.2004.
97. Активизатор трения-сцепления [Текст] : пат. 2362799 Рос. Федерация : МПК С10М103/06, С09К3/14 / Шаповалов В.В., Майба И.А. [и др.] ; заявители и патентообладатели Шаповалов В.В., Майба И.А. – № 2006136835/04 ; заявл. 27.04.2008 ; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 21.
98. United States Patent № 4182437, 08.01.1980.
99. Майба, И.А. Теоретические предпосылки регулирования трения и сцепления в системе колесо-рельс [Текст] / И.А. Майба // Вестник РГУПС. – 1999. – №1. – С. 31-41.
100. СП 119.13330.2012 Железные дороги колеи 1520 мм. Актуализированная редакция СНиП 32-01-95. – М., 2012. – 52 с.
101. СП 37.13330.2012 Промышленный транспорт. Актуализированная редакция СНиП 2.05.07-91*. – М., 2012. – 196 с.
102. Electromagnetic traction increaser : United States Patent Office. 2,198,928. / D.E. Wehner ; April 30, 1940.
103. Раков, В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза (1976–1985 гг.) [Текст] / В.А. Раков. – М. : Транспорт, 1990. – 238 с.
104. Лазерная очистка рельсов [Текст] // Путь и путевое хозяйство. – № 5. – 2005.

105. Косиков, С.И. Фрикционные свойства железнодорожных рельсов [Текст] / С.И. Косиков. – М. : Наука, 1967. – 112 с.
106. United Kingdom Patent GB 1265979, B61C 15/08 ; 1972.
107. 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.
108. 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.
109. Воробьёв, В.И. Особенности синтеза механической части энергосберегающего тягового привода локомотива [Текст] / В.И. Воробьёв, О.В. Измеров, М.И. Борзенков, В.С. Адващенко, В.О. Корчагин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орёл : Госуниверситет-УНПК, 2015. – № 1 (309). – С. 73–80. – ISSN 2073-7408.
110. 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. Рогалева. – Брянск : БГТУ, 2017. – С. 105-113. – ISBN 978-5-89838-970-3.
111. Воробьёв, В.И. Синтез новых решений приводов транспортных систем в интеллектуальных САПР [Текст] : монография / В.И. Воробьёв, 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.
112. 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.

113. 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.

114. 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.

115. 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.

116. 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.

117. 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.

118. 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.
119. 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.
120. 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.
121. 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.
122. 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.
123. Тихомиров, В.П. Метод прогнозирования буксования путем анализа характеристик контакта колеса и рельса [Текст] / В.П. Тихомиров, А.Г. Стриженок, В.О. Корчагин, О.В. Измеров // Вестник БГТУ. – 2016. – №4 (52). – С. 57–65. – ISSN 1999-8775.
124. Космодамианский, А.С. Новые методы предотвращения буксования 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.

125. 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.

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

127. 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.

128. 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.

129. 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.

130. 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.

131. 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 БГТУ. – 2017. – №2 (55). – С. 140-145. – ISSN 1999-8775.

132. 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.
133. 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. студенческой науч.-техн. конф. – Воронеж : ГОУВПО «ВГТУ», 2010. – С. 62-65.
134. 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.
135. 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. студенческой науч.-техн. конф. – Воронеж : ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2013. – С. 31-33. – ISBN 978-5-7731-0340-0.
136. 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.
137. Воробьев, В.И. Моделирование усилителя сцепления колеса с рельсом [Текст] / В.И. Воробьев, В.О. Корчагин, С.Г. Волохов // Совершенствование транспортных машин: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Рогалева. – Брянск : БГТУ, 2017. – С. 147-153. – ISBN 978-5-89838-970-3.
138. Воробьев, В.И. Индентерное устройство для определения молекулярной составляющей коэффициента трения [Текст] / В.И. Воробьев, 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.

139. Демирчян, К.С. Теоретические основы электротехники [Текст] : В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1. – 4-е изд. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб. : Питер, 2003. – 463 с.: ил. – ISBN 5-94723-620-6, ISBN 5-94723-479-3.

140. Ивахин, А.И. Стенд для исследования тяговых свойств в системе колесорельс железнодорожных транспортных средств [Текст] / А.И. Ивахин, В.И. Травиничев, Д.И. Петраков // Тяжелое машиностроение. – 2011. – №4. – С. 2-5.

141. Сливинская, А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. Учебное пособие для студентов вузов [Текст] / А.Г. Сливинская. – М., «Энергия», 1972. – 248 с. с ил.

142. Самарский, А.А. Введение в численные методы. Учебное пособие для вузов. 3-е изд., стер. [Текст] / А.А. Самарский. – СПб. : Издательство «Лань», 2005. – 288 с: ил.

143. Буль, О.Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEEM [Текст] : Учеб.пособие для студ. высш. учеб. заведений / О.Б. Буль. – М. : Изд. центр «Академия», 2005. – 336 с. – ISBN 5-7695-2064-7.

144. Буль, О.Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS [Текст] : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О.Б. Буль. – М. : Изд. центр «Академия», 2006. – 288 с. – ISBN 5-7695-2064-7.

145. Геча, В.Я. Использование конечноэлементных моделей для проектирования фрагментов сложных электромеханических систем [Текст] / В.Я. Геча // Труды ВНИИЭМ. – М., 1985.

146. Evans, L.C. Partial Differential Equations / L.C. Evans // American Mathematical Society. – Providence. – 1998. – ISBN 0-8218-0772-2.

147. Polyanin, A.D. Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists / A.D. Polyanin // Chapman & Hall CRC Press. – Boca Raton. – 2002. – ISBN 1-58488-299-9.

148. Stratton, J.A. Electromagnetic Theory / J.A. Stratton. – McGraw-Hill, New York. – 1941. – p. 167.
149. Ландау, Л.Д. Теория поля [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – Издание 8-е, стереотипное. – М. : Физматлит, 2001. – 534 с. – ISBN 5-9221-0056-4.
150. Hirth, J.P. Theory of dislocations / John Price Hirth, Jens Lothe. – 2rid ed. Reprint. Originally published. – New York : Wiley, 1982. – ISBN 0-89464-617-6.
151. Hardy, W.B. Collected Scientific Papers / W.B. Hardy. – Cambridge. – 1936.
152. Kontorova, T.A. Zh. Eksp. Teor. Fiz. – 8, 1340 / T.A. Kontorova, Ya.I. Frenkel. – 1938.
153. Галанин, М.П. Метод конечных суперэлементов и его применения для решения задач науки и техники [Текст] / М.П. Галанин, С.А. Лазарева, Е.Б. Савенков, Д.А. Яковлев // Параллельные вычислительные технологии – 2007: Сборник трудов международной конференции. – Челябинск, 2007. – С. 87-100.
154. Харрис, У.Д. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса [Текст] : Пер. с англ. / У. Дж. Харрис, С.М. Захаров, Дж. Ландгрэн, Х. Турне, В. Эберсен. – М. : «Интертекст», 2002. – 408 с. – ISBN 5-89277-037-0.
155. UM Loko [Электронный ресурс] : Программный комплекс «Универсальный механизм». – Режим доступа: <http://www.umlabor.ru/plugins/catalogue/index.php?id=4> (дата обращения 20.09.2015).
156. Ромен, Ю.С. Влияние продольных сил в поездах на опасность схода вагонов в зависимости от их загрузки [Текст] / Ю.С. Ромен, Л.А. Мугинштейн, Л.И. Неворова // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 3 (46). – С. 64-68.
157. Нормы допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм федерального железнодорожного транспорта [Текст]. – М. : Транспорт, 2001. – 126 с.
158. Способ определения точки Кюри металлических высокотемпературных ферромагнитных сплавов [Текст] : пат. 2478935 Рос. Федерация : МПК G01N25/12 / Поводатор А.М. [и др.]. ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «УРФУ». – № 2011146195/28 ; заявл. 14.11.2011 ; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10.

159. Черкашин, Ю.М. Сравнение некоторых критериев, оценивающих опасность схода путём всползания колеса на рельс [Текст] / Ю.М. Черкашин, Д.Ю. Погорелов, В.А. Симонов // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2005. – №8 (90). – С. 98-103.
160. Родиков, А.Н. Быстрые алгоритмы решения контактной задачи колесо-рельс в задачах моделирования динамики рельсовых экипажей [Текст] / А.Н. Родиков // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник докладов (Казань, 20-24 августа 2015 г.). – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015. – С. 3227-3229. – ISBN 978-5-00019-492-8.
161. Kik, W. A Fast Approximate Method to Calculate Normal Load at Contact between Wheel and Rail and Creep Forces During Rolling / W. Kik, J. Piotrowski // Proceedings of 2nd mini. conf. Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. – 1996. – P. 52-61.
162. Лаборатория вычислительной механики БГТУ [Сайт]. – Режим доступа: <http://www.universalmechanism.com> (дата обращения 14.09.2017).
163. ГОСТ 11018-2011 Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2012. – 9 с.
164. ГОСТ Р 51685-2013 Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2014. – 41 с.
165. Полещук, Н.Н. AutoLisp и Visual LISP в среде AutoCAD [Текст] / Н.Н. Полещук, П.В. Лоскутов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 960 с. : ил. – ISBN 5-94157-738-9.
166. Полещук, Н.Н. AutoCAD 2012 [Текст] / Н.Н. Полещук. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 752 с. : ил.+CD-ROM – ISBN 987-5-9775-0709-7.
167. Джамп, Д. AutoCAD. Программирование [Текст] / Д. Джамп. Пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1992. – 336 с. : ил. – ISBN 5-256-00807-2.
168. Буйносов, А.П. Методы повышения ресурса колесных пар тягового подвижного состава [Текст] : монография / А.П. Буйносов. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. – 224 с. – ISBN 978-5-9994-0038-3.

169. Popovici, R.I. Friction in Wheel - Rail Contacts. Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands February. 2010.
170. Харди, Г.Г. Ряды Фурье [Текст] / Г.Г. Харди, В.В. Рогозинский. : Либроком, 2009. – 152 с. – ISBN: 978-5-397-00714-6.
171. Калиткин, Н.Н. Численные методы [Текст] / Н.Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.
172. Сакало, А.В. Математическое моделирование профилей изношенных поверхностей тел качения [Текст] / А.В. Сакало // Вестник БГТУ. – 2009. – № 3. – С. 78-82.
173. Каплан, И.А. Практические занятия по интегральному исчислению и интегрированию дифференциальных уравнений [Текст] / И.А. Каплан. – изд. 2-е, стереотипное. – Харьков. : Изд-во Харьковского гос. ун-та, 1971. – 947 с. – (Практические занятия по высшей математике : в V ч. / И.А. Каплан. ; ч. III).
174. Керопян, А.М. Теоретические исследования условий обеспечения конформного контакта системы «колесо-рельс» карьерного железнодорожного транспорта [Текст] / А.М. Керопян // Трение и смазка в машинах и механизмах. – М. : Машиностроение, 2013. – № 2. – С. 11-16.
175. Керопян, А.М. Условия взаимодействия колес карьерных локомотивов с рельсами и определение рациональных геометрических параметров их контактирующих поверхностей [Текст] / А.М. Керопян, П.Е. Сизин, Н.М. Кряжев, Р.К. Басов // Горная Промышленность. – М. : Гемос Лимитед, 2012. – №4. – С. 108.
176. Способ определения бокового усилия прижатого колеса на рельс при движении железнодорожного состава [Текст] : пат. 2426664 Рос. Федерация : МПК В61К9/00 / Ватонин А.А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «УрГУПС». – № 2010108960/11 ; заявл. 10.03.2010 ; опубл. 20.08.2011, Бюл. № 23. – 8 с: ил.
177. Таран, И.А. Тормозные устройства шахтных локомотивов [Текст] : монография / И.А. Таран, А.В. Новицкий; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д. : НГУ, 2014. – 205 с. – ISBN 978-966-350-454-4.

Приложение А (обязательное)

Результаты моделирования поперечного положения колёсной пары в колее

Таблица А.1 – Геометрические параметры положений колёсной пары в колее
(колёса – новые, левый рельс – новый, правый рельс – новый)

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм						
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Прямая, h=0 мм													
-11	119	120	130	131	7,8	8	7,9	8,0	-0,11	-5,82	5,6	0	24
-10	124	127	135	139	8,1	8,2	8,1	8,2	-0,08	-5,79	5,63	-0,1	22,5
-9	123	126	135	137	8	8,2	8,1	8,2	-0,08	-5,79	5,63	-2	22
-8	118	126	129	137	7,8	8,2	7,8	8,2	-0,07	-5,78	5,64	-3	21
-6	124	125	135	137	8,1	8,1	8,1	8,2	-0,06	-5,77	5,65	-5	19
-5	124	125	135	137	8,1	8,1	8,1	8,2	-0,05	-5,76	5,66	-6	18
-4	125	126	136	137	8,2	8,2	8,1	8,2	-0,04	-5,75	5,67	-7	17
-2	124	119	135	130	8,1	7,9	8,1	7,9	-0,03	-5,74	5,68	-9	15
-1	124	125	135	136	8,1	8,1	8,1	8,1	-0,02	-5,73	5,7	-10	14
0	125	126	136	137	8,2	8,2	8,1	8,2	-0,01	-5,72	5,7	-11	13
2	124	125	135	136	8,1	8,1	8,1	8,1	0	-5,71	5,71	-13	11
3	124	125	135	136	8,1	8,1	8,1	8,1	0,02	-5,69	5,73	-14	10
5	125	125	130	136	8,2	8,1	7,9	8,1	0,03	-5,69	5,74	-15,5	8,5
6	124	125	135	137	8,1	8,1	8,1	8,2	0,03	-5,68	5,75	-17	7
7	124	124	136	136	8,1	8,1	8,1	8,1	0,05	-5,66	5,76	-18	6
9	125	125	136	136	8,2	8,1	8,1	8,1	0,06	-5,66	5,77	-19,5	4,5
10	125	123	137	134	8,2	8	8,2	8,0	0,07	-5,64	5,78	-21	3
11	125	124	136	135	8,2	8,1	8,1	8,0	0,08	-5,63	5,79	-22	0,1
13	121	119	131	130	8	7,9	8,0	7,9	0,11	-5,6	5,82	-24	0
Кривая, возвышение правого рельса h=50 мм													
-12	119	120	129	131	7,9	8	7,8	8,0	1,69	-4,03	7,4	0	24,5
-10	125	127	135	139	8,2	8,2	8,1	8,2	1,71	-4,01	7,42	-0,1	23
-9	121	126	135	137	8	8,2	8,1	8,2	1,71	-4	7,42	-2,5	22
-8	119	126	133	137	7,9	8,2	8,0	8,2	1,72	-3,99	7,43	-4	20,5
-7	124	125	136	137	8,1	8,2	8,1	8,2	1,73	-3,98	7,44	-4,5	20
-5	124	125	135	137	8,1	8,2	8,1	8,2	1,74	-3,97	7,45	-6,5	18
-4	124	125	135	137	8,1	8,2	8,1	8,2	1,75	-3,96	7,47	-7,5	17
-3	125	119	135	131	8,2	7,9	8,1	8,0	1,76	-3,95	7,47	-9	15,5
-2	124	125	135	136	8,1	8,2	8,1	8,1	1,78	-3,94	7,49	-10	14,5
0	124	125	136	137	8,1	8,2	8,1	8,2	1,78	-3,93	7,49	-11,5	13
2	124	125	135	136	8,1	8,2	8,1	8,1	1,8	-3,92	7,51	-13,5	11
3	124	125	136	136	8,1	8,2	8,1	8,1	1,81	-3,91	7,52	-14,5	10
5	125	125	131	136	8,2	8,2	8,0	8,1	1,82	-3,9	7,53	-16	8,5
6	124	125	136	136	8,1	8,2	8,1	8,1	1,83	-3,89	7,54	-17	7,5
8	124	124	136	136	8,1	8,1	8,1	8,1	1,84	-3,87	7,55	-19	5,5
8	125	124	137	136	8,2	8,1	8,2	8,1	1,85	-3,86	7,56	-19,5	5
10	125	118	136	131	8,2	7,8	8,1	8,0	1,86	-3,85	7,57	-21,5	3
11	125	123	136	135	8,2	8	8,1	8,0	1,87	-3,84	7,58	-22,5	0,1
13	120	119	131	130	7,9	7,9	8,0	7,9	1,89	-3,82	7,6	-24,5	0

Продолжение таблицы А.1

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм			левое колесо	правое колесо	левый гребень	правый гребень
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Кривая, возвышение правого рельса h=100 мм													
-12	119	120	130	131	7,9	8	7,8	8,0	3,47	-2,25	9,18	0	24,5
-10	123	127	135	139	8	8,2	8,1	8,2	3,5	-2,22	9,21	-0,1	23
-9	119	126	135	137	7,9	8,2	8,1	8,2	3,5	-2,21	9,21	-2,5	22
-8	120	126	131	137	8	8,2	7,9	8,2	3,51	-2,2	9,22	-3,5	21
-7	124	125	135	137	8,1	8,2	8,1	8,2	3,52	-2,19	9,23	-5	19,5
-6	124	125	135	137	8,1	8,2	8,1	8,2	3,53	-2,18	9,24	-6	18,5
-4	124	125	135	137	8,1	8,2	8,1	8,2	3,54	-2,17	9,25	-7,5	17
-3	124	122	136	130	8,1	8	8,1	7,9	3,55	-2,17	9,26	-8,5	16
-1	124	125	135	136	8,1	8,2	8,1	8,1	3,56	-2,15	9,27	-10,5	14
0	124	125	135	136	8,1	8,2	8,1	8,1	3,57	-2,14	9,28	-11,5	13
1	124	125	135	136	8,1	8,2	8,1	8,1	3,58	-2,13	9,29	-12,5	12
3	125	125	136	136	8,1	8,2	8,1	8,1	3,59	-2,12	9,3	-14	10,5
4	123	125	134	136	8	8,2	8,0	8,1	3,6	-2,11	9,31	-15,5	9
6	124	125	136	136	8,1	8,2	8,1	8,1	3,61	-2,1	9,32	-17	7,5
7	125	125	136	136	8,1	8,2	8,1	8,1	3,62	-2,09	9,33	-18	6,5
8	125	124	136	136	8,1	8,1	8,1	8,1	3,63	-2,08	9,34	-19,5	5
10	125	120	136	131	8,1	8	8,1	8,0	3,65	-2,07	9,36	-21	3,5
11	125	124	136	135	8,1	8,1	8,1	8,0	3,66	-2,05	9,37	-22,5	0,1
13	120	119	132	130	8	7,8	8,0	7,9	3,69	-2,03	9,4	-24,5	0
Кривая, возвышение правого рельса h=150 мм													
-11	119	120	130	131	7,9	8	7,8	8,0	5,28	-0,43	10,99	0	24
-10	124	127	135	139	8,1	8,2	8,1	8,2	5,31	-0,4	11,02	-0,1	23
-9	124	126	135	137	8,1	8,2	8,1	8,2	5,31	-0,4	11,02	-2	22
-8	119	125	131	137	7,9	8,2	8,0	8,2	5,32	-0,39	11,03	-3	21
-7	124	125	135	137	8,1	8,2	8,1	8,2	5,33	-0,38	11,04	-4,5	19,5
-5	124	125	135	137	8,1	8,2	8,1	8,2	5,34	-0,37	11,05	-6	18
-4	124	125	135	136	8,1	8,2	8,1	8,1	5,35	-0,36	11,06	-7	17
-3	124	119	135	130	8,1	7,9	8,1	7,9	5,36	-0,35	11,07	-8	16
-1	124	125	135	136	8,1	8,2	8,1	8,1	5,37	-0,34	11,08	-10	14
0	124	125	135	136	8,1	8,2	8,1	8,1	5,38	-0,33	11,09	-11	13
1	124	125	135	136	8,1	8,2	8,1	8,1	5,39	-0,32	11,1	-12	12
3	126	128	136	136	8,2	8,2	8,1	8,1	5,41	-0,31	11,12	-14	10
5	120	125	136	136	8	8,2	8,1	8,1	5,42	-0,3	11,13	-15,5	8,5
6	124	125	132	136	8,1	8,2	8,0	8,1	5,43	-0,29	11,14	-16,5	7,5
7	125	124	136	136	8,1	8,1	8,1	8,1	5,44	-0,28	11,15	-18	6
9	125	124	136	136	8,1	8,1	8,1	8,1	5,45	-0,27	11,16	-19,5	4,5
10	125	120	136	136	8,1	8	8,1	8,1	5,46	-0,26	11,17	-20,5	3,5
11	125	124	136	131	8,1	8,1	8,1	8,0	5,47	-0,24	11,18	-22	0,1
13	120	119	131	130	8	7,9	8,0	7,9	5,5	-0,22	11,21	-24	0

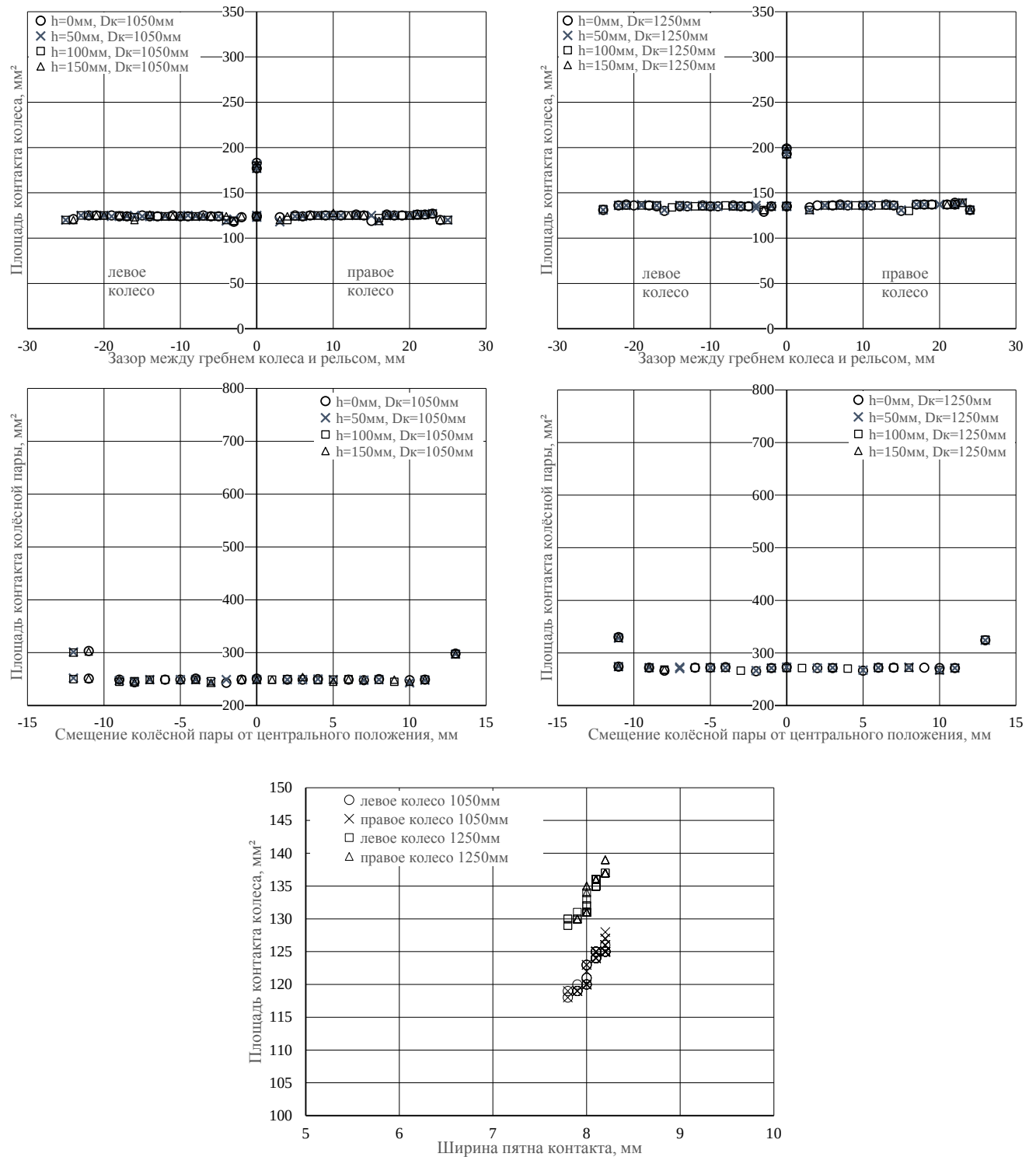


Рисунок А.1 – Геометрические параметры контакта колеса с рельсом
(колёса – новые, левый рельс – новый, правый рельс – новый)

Таблица А.2 – Геометрические параметры положений колёсной пары в колее (колёса – новые, левый рельс – изношенный, правый рельс – изношенный)

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм						
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Прямая, h=0 мм													
-17	209	216	228	237	13,1	13,5	13,1	13,5	-0,15	-5,86	5,56	0	35,5
-16	231	246	251	268	13,9	14,7	13,9	14,7	-0,13	-5,84	5,59	-0,1	34
-14	221	242	240	271	13,5	14,4	13,6	14,7	-0,12	-5,83	5,59	-3	32,5
-12	211	246	231	268	13,3	14,7	13,3	14,7	-0,1	-5,81	5,61	-5	30,5
-10	235	245	256	267	14	14,6	14,0	14,6	-0,08	-5,79	5,63	-7	28,5
-8	231	239	252	261	13,9	14,3	13,9	14,3	-0,07	-5,78	5,64	-9	26,5
-6	236	244	257	266	14,1	14,6	14,0	14,5	-0,05	-5,76	5,66	-11	24,5
-5	237	244	254	260	14,3	14,6	14,0	14,1	-0,04	-5,75	5,67	-12,5	23
-2	233	238	253	265	13,9	14,1	14,0	14,4	-0,02	-5,73	5,69	-15	20,5
0	213	229	233	249	13,4	13,9	13,5	14,0	-0,01	-5,72	5,7	-17	18,5
2	239	214	250	232	14,4	13,5	13,7	13,4	0,01	-5,7	5,72	-19	16,5
4	236	233	261	255	14,1	14	14,4	14,0	0,02	-5,69	5,74	-21	14,5
6	240	240	258	256	14,4	14,4	14,2	14,1	0,04	-5,67	5,75	-22,5	13
8	237	234	263	262	14,3	14	14,4	14,4	0,06	-5,66	5,77	-25	10,5
10	241	239	259	255	14,5	14,3	14,3	14,0	0,07	-5,64	5,78	-26,5	9
12	238	233	264	259	14,3	14	14,5	14,1	0,09	-5,62	5,8	-29	6,5
14	242	209	260	232	14,5	13,2	14,3	13,4	0,1	-5,61	5,82	-30,5	5
16	239	219	265	240	14,4	13,5	14,6	13,5	0,12	-5,59	5,83	-33	0,1
19	216	208	237	227	13,5	13,1	13,5	13,1	0,16	-5,55	5,87	-35,5	0
Кривая, возвышение правого рельса h=50 мм													
-17	209	218	228	236	13,2	13,9	13,1	13,5	1,65	-4,07	7,36	0	36
-16	226	246	251	268	13,6	14,7	13,8	14,7	1,67	-4,05	7,38	-0,1	34,5
-14	216	242	241	263	13,5	14,4	13,5	14,4	1,67	-4,04	7,38	-3	33
-12	213	246	229	268	13,4	14,7	13,3	14,7	1,69	-4,02	7,4	-5	31
-10	235	245	256	268	14	14,6	14,0	14,7	1,71	-4,01	7,42	-7	29
-8	236	245	257	267	14,1	14,6	14,1	14,5	1,72	-3,99	7,43	-9	27
-6	236	244	258	267	14,1	14,5	14,1	14,5	1,74	-3,97	7,45	-11	25
-4	237	244	259	266	14,3	14,5	14,3	14,5	1,76	-3,96	7,47	-13	23
-2	228	237	244	265	13,9	14,1	13,7	14,4	1,77	-3,94	7,48	-15,5	20,5
0	213	227	232	255	13,4	13,9	13,4	14,0	1,78	-3,93	7,49	-17	19
2	239	214	255	232	14,3	13,4	13,9	13,4	1,8	-3,91	7,51	-19	17
4	240	241	262	257	14,4	14,2	14,5	14,1	1,82	-3,9	7,53	-21	15
7	236	235	262	263	14,1	14	14,5	14,4	1,83	-3,88	7,54	-23,5	12,5
8	241	240	259	256	14,5	14,2	14,3	14,1	1,85	-3,87	7,56	-25	11
10	237	234	264	261	14,3	14	14,5	14,1	1,86	-3,85	7,57	-27	9
12	242	238	264	252	14,5	14,1	14,5	13,9	1,88	-3,83	7,59	-29	7
15	243	210	265	228	14,5	13,2	14,6	13,2	1,9	-3,82	7,61	-31,5	4,5
16	239	217	261	241	14,3	13,5	14,3	13,5	1,91	-3,8	7,62	-33	0,1
19	217	208	236	228	13,6	13,1	13,5	13,2	1,95	-3,77	7,66	-36	0

Продолжение таблицы А.2

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм			левое колесо	правое колесо	левый гребень	правый гребень
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Кривая, возвышение правого рельса h=100 мм													
-17	208	216	228	237	13,1	13,5	13,1	13,5	3,43	-2,29	9,14	0	36
-16	230	246	252	268	14	14,7	13,9	14,7	3,45	-2,26	9,16	-0,1	34,5
-14	215	246	232	262	13,5	14,7	13,3	14,2	3,46	-2,25	9,17	-3	33
-12	212	246	233	268	13,3	14,7	13,5	14,7	3,48	-2,23	9,19	-5	31
-10	235	245	256	268	14	14,6	14,0	14,7	3,49	-2,22	9,2	-7	29
-8	236	245	257	267	14,1	14,6	14,0	14,5	3,51	-2,2	9,22	-9	27
-6	237	244	258	267	14,1	14,5	14,1	14,5	3,52	-2,19	9,23	-11	25
-4	237	244	259	266	14,1	14,5	14,3	14,5	3,54	-2,17	9,25	-13	23
-2	230	243	247	265	14	14,4	13,8	14,4	3,55	-2,16	9,27	-15	21
0	213	232	233	249	13,4	14	13,5	14,0	3,57	-2,14	9,28	-17	19
2	233	213	259	232	14	13,4	14,3	13,5	3,59	-2,13	9,3	-19	17
4	240	232	262	257	14,3	14	14,3	14,1	3,6	-2,11	9,31	-21	15
6	241	241	263	263	14,4	14,2	14,4	14,4	3,62	-2,09	9,33	-23	13
8	241	240	263	262	14,4	14,2	14,4	14,2	3,63	-2,08	9,34	-25	11
10	242	239	259	255	14,5	14,1	14,3	14,0	3,65	-2,07	9,36	-27	9
12	242	234	265	260	14,5	14,1	14,5	14,1	3,66	-2,05	9,37	-29	7
15	243	209	265	230	14,6	13,2	14,5	13,3	3,68	-2,03	9,39	-31,5	4,5
17	243	225	266	239	14,6	13,6	14,6	13,7	3,7	-2,02	9,41	-33,5	0,1
19	216	208	244	227	13,5	13,1	13,7	13,1	3,74	-1,98	9,45	-36	0
Кривая, возвышение правого рельса h=150 мм													
-17	208	217	227	236	13,1	13,5	13,1	13,5	5,23	-0,48	10,95	0	36
-16	230	246	251	268	14	14,7	13,9	14,6	5,26	-0,45	10,97	-0,1	35
-14	217	247	236	269	13,5	14,7	13,6	14,7	5,28	-0,44	10,99	-3	33
-12	210	246	230	269	13,3	14,7	13,3	14,7	5,29	-0,42	11	-5	31
-10	234	245	255	266	14	14,6	14,0	14,5	5,31	-0,4	11,02	-7	29
-8	236	245	258	267	14	14,6	14,1	14,5	5,32	-0,39	11,03	-9	27
-6	237	244	258	267	14,1	14,5	14,1	14,5	5,34	-0,37	11,05	-11	25
-4	238	244	257	264	14,3	14,5	14,0	14,4	5,35	-0,36	11,07	-13	23
-2	230	242	249	266	14	14,4	13,7	14,5	5,37	-0,34	11,08	-15	21
0	213	234	232	254	13,4	14,1	13,4	13,9	5,38	-0,33	11,09	-17	19
2	228	213	250	232	13,9	13,4	13,9	13,5	5,4	-0,31	11,11	-19	17
4	238	233	260	256	14,3	14	14,3	14,1	5,42	-0,3	11,13	-21	15
6	241	241	263	263	14,4	14,2	14,4	14,2	5,43	-0,28	11,14	-23	13
8	242	240	264	262	14,5	14,2	14,5	14,2	5,45	-0,27	11,16	-25	11
10	242	240	264	262	14,5	14,2	14,5	14,2	5,46	-0,25	11,17	-27	9
12	243	239	263	255	14,6	14,1	14,4	14,1	5,48	-0,24	11,19	-29	7
14	243	213	265	229	14,6	13,4	14,6	13,3	5,49	-0,22	11,2	-31	5
16	242	219	266	240	14,5	13,5	14,6	13,5	5,51	-0,2	11,22	-33	0,1
19	218	209	236	227	13,7	13,2	13,6	13,1	5,54	-0,18	11,25	-36	0

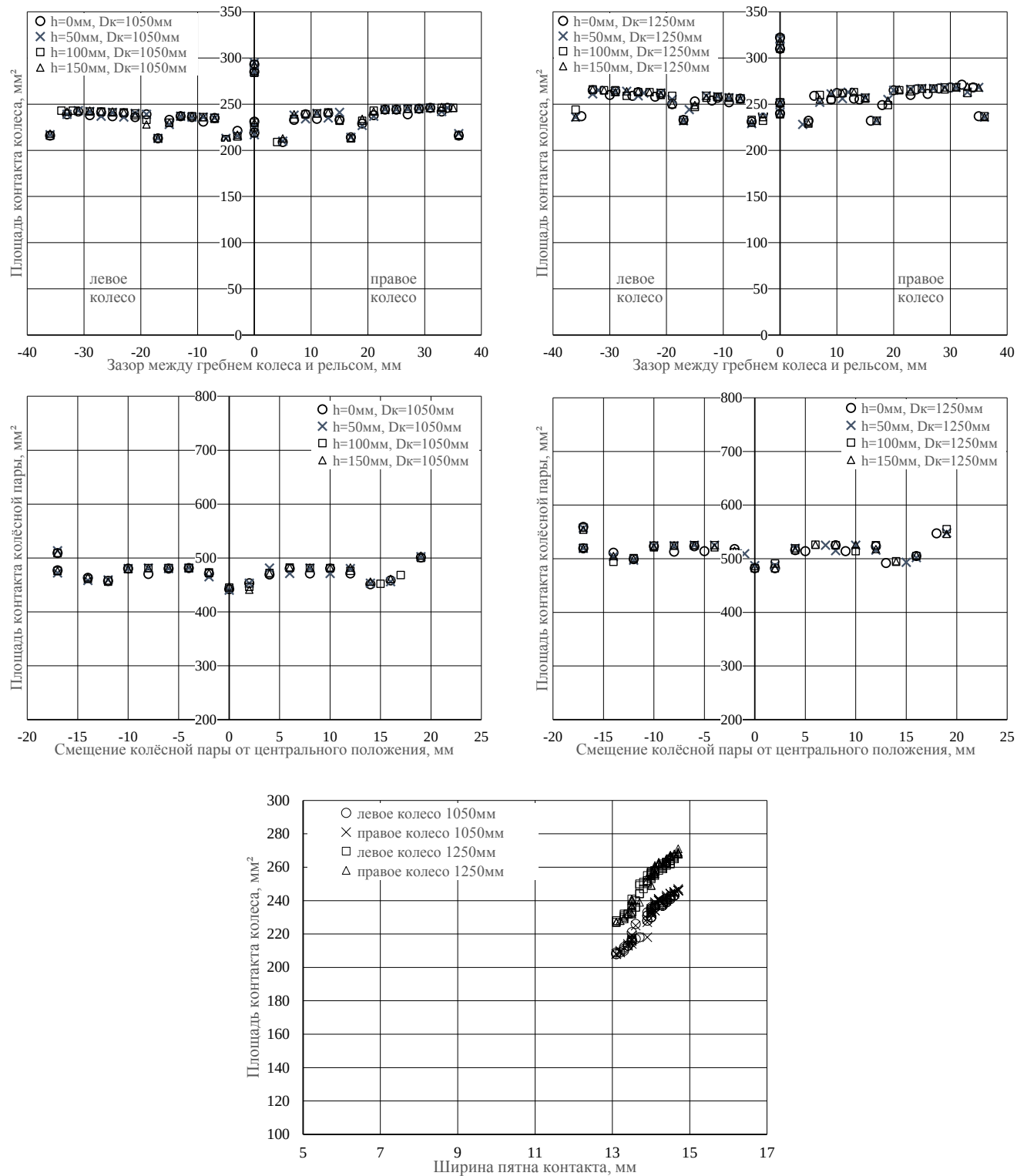


Рисунок А.2 – Геометрические параметры контакта колеса с рельсом
(колёса – новые, левый рельс – изношенный, правый рельс – изношенный)

Таблица А.3 – Геометрические параметры положений колёсной пары в колее (колёса – новые, левый рельс – новый, правый рельс – изношенный)

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм						
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Прямая, h=0 мм													
-14	118	219	129	246	7,8	13,8	7,8	13,9	-0,19	-5,91	5,52	0	30
-12	123	247	134	270	8	14,8	8,0	14,8	-0,17	-5,88	5,54	-0,1	28
-12	122	244	129	266	8	14,6	7,8	14,7	-0,16	-5,88	5,55	-2,5	27,5
-10	123	242	134	264	8	14,6	8,0	14,6	-0,15	-5,86	5,56	-4	26
-9	123	242	134	264	8	14,6	8,0	14,6	-0,14	-5,85	5,57	-5,5	24,5
-7	124	247	134	264	8,1	14,8	8,0	14,6	-0,13	-5,84	5,59	-7,5	22,5
-5	123	241	134	263	8	14,5	8,0	14,5	-0,11	-5,82	5,6	-9	21
-3	123	241	136	264	8	14,5	8,1	14,6	-0,1	-5,81	5,61	-11	19
-2	123	222	134	238	8	14	8,0	13,8	-0,09	-5,8	5,63	-12	18
0	123	216	135	239	8	13,7	8,1	13,8	-0,07	-5,79	5,64	-14	16
2	121	234	129	262	7,9	14,2	7,8	14,4	-0,06	-5,77	5,65	-16	14
4	125	245	135	261	8,1	14,7	8,1	14,3	-0,05	-5,76	5,67	-17,5	12,5
5	124	239	135	260	8,1	14,3	8,1	14,3	-0,03	-5,75	5,68	-19	11
7	124	238	135	260	8,1	14,2	8,1	14,3	-0,02	-5,73	5,69	-20,5	9,5
9	124	237	135	259	8,1	14,2	8,1	14,3	-0,01	-5,72	5,7	-22,5	7,5
10	124	230	135	258	8,1	14,1	8,1	14,2	0,01	-5,71	5,72	-23,5	6,5
12	124	213	137	232	8,1	13,5	8,1	13,5	0,02	-5,69	5,73	-26	4
14	124	221	135	247	8,1	14	8,1	14,1	0,03	-5,68	5,74	-27,5	0,1
16	120	212	131	232	7,9	13,4	7,9	13,5	0,07	-5,65	5,78	-30	0
Кривая, возвышение правого рельса h=50 мм													
-15	118	221	129	239	7,8	13,9	7,8	13,8	1,6	-4,11	7,31	0	30,5
-13	123	248	135	270	8	14,8	8,1	14,7	1,62	-4,09	7,33	-0,1	28,5
-12	118	243	131	266	7,8	14,6	8,0	14,5	1,63	-4,08	7,34	-3	27,5
-10	123	242	134	265	8	14,6	8,0	14,5	1,64	-4,07	7,35	-4,5	26
-9	123	242	136	271	8	14,6	8,1	14,8	1,65	-4,06	7,37	-6	24,5
-7	125	247	134	264	8,1	14,7	8,0	14,5	1,67	-4,04	7,38	-8	22,5
-5	123	241	136	270	8	14,5	8,1	14,7	1,68	-4,03	7,39	-10	20,5
-4	123	241	134	263	8	14,5	8,0	14,4	1,69	-4,02	7,4	-11	19,5
-1	125	217	134	240	8,1	13,8	8,0	13,9	1,71	-4,01	7,42	-13,5	17
0	123	219	135	237	8	13,8	8,1	13,7	1,72	-3,99	7,43	-14,5	16
2	118	240	130	268	7,8	14,4	7,9	14,7	1,73	-3,98	7,44	-16	14,5
4	124	239	135	261	8,1	14,3	8,1	14,3	1,74	-3,97	7,46	-18	12,5
5	125	245	135	260	8,1	14,6	8,1	14,3	1,76	-3,95	7,47	-19,5	11
7	124	238	137	267	8,1	14,2	8,1	14,6	1,77	-3,94	7,48	-21,5	9
9	124	238	135	259	8,1	14,2	8,1	14,2	1,79	-3,93	7,5	-23	7,5
10	124	233	135	247	8,1	14,1	8,1	14,1	1,8	-3,92	7,51	-24,5	6
12	125	213	135	232	8,1	13,5	8,1	13,5	1,81	-3,9	7,52	-26,5	4
13	124	225	135	241	8,1	14,1	8,1	13,9	1,82	-3,89	7,53	-27,5	0,1
16	120	212	131	231	8	13,4	8,0	13,4	1,86	-3,85	7,57	-30,5	0

Продолжение таблицы А.3

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм			левое колесо	правое колесо	левый гребень	правый гребень
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Кривая, возвышение правого рельса h=100 мм													
-15	118	220	129	241	7,8	13,9	7,8	13,9	3,38	-2,33	9,09	0	30,5
-13	123	248	134	270	8	14,8	8,0	14,7	3,41	-2,31	9,12	-0,1	29
-12	118	243	129	265	7,8	14,5	7,8	14,6	3,42	-2,3	9,13	-3	27,5
-11	123	242	134	265	8	14,5	8,0	14,6	3,43	-2,29	9,14	-4	26,5
-9	125	248	136	271	8,1	14,8	8,1	14,8	3,44	-2,27	9,15	-6	24,5
-7	123	242	134	264	8	14,5	8,0	14,4	3,45	-2,26	9,16	-7,5	23
-5	125	247	136	270	8,1	14,7	8,1	14,7	3,47	-2,24	9,18	-9,5	21
-4	123	241	134	263	8	14,3	8,0	14,4	3,48	-2,23	9,19	-11	19,5
-2	125	218	136	239	8,1	13,8	8,1	13,8	3,49	-2,22	9,2	-13	17,5
0	123	218	136	242	8	13,8	8,1	13,9	3,51	-2,21	9,22	-14,5	16
2	119	246	129	261	7,9	14,6	7,8	14,4	3,52	-2,19	9,23	-16	14,5
3	124	239	135	261	8,1	14,3	8,1	14,4	3,53	-2,18	9,24	-17,5	13
5	125	245	137	267	8,1	14,6	8,2	14,6	3,55	-2,17	9,26	-19,5	11
7	124	238	135	260	8,1	14,2	8,1	14,2	3,56	-2,15	9,27	-21	9,5
9	126	243	137	266	8,2	14,5	8,2	14,6	3,57	-2,14	9,28	-23	7,5
10	124	226	135	249	8,1	13,9	8,1	14,1	3,58	-2,13	9,29	-24,5	6
12	124	213	137	232	8,1	13,5	8,2	13,5	3,6	-2,12	9,31	-26,5	4
14	126	227	135	246	8,2	14,1	8,1	13,9	3,61	-2,1	9,32	-28	0,1
16	120	212	131	231	8	13,4	8,0	13,4	3,65	-2,07	9,36	-30,5	0
Кривая, возвышение правого рельса h=150 мм													
-15	118	219	129	242	7,8	13,9	7,8	13,9	5,2	-0,52	10,91	0	31
-13	124	248	134	270	8	14,8	8,0	14,7	5,22	-0,49	10,93	-0,1	29
-12	118	242	132	265	7,8	14,5	8,0	14,4	5,23	-0,48	10,94	-3	28
-10	123	242	136	271	8	14,5	8,1	14,8	5,24	-0,47	10,95	-5	26
-9	125	248	136	271	8,1	14,8	8,1	14,8	5,26	-0,46	10,97	-6,5	24,5
-7	125	248	136	270	8,1	14,8	8,1	14,7	5,27	-0,44	10,98	-8	23
-6	123	241	134	263	8	14,4	8,0	14,4	5,28	-0,43	10,99	-9,5	21,5
-4	125	247	136	270	8,1	14,6	8,1	14,7	5,29	-0,42	11	-11	20
-2	125	219	137	238	8,1	13,9	8,2	13,8	5,31	-0,4	11,02	-13	18
0	125	220	137	242	8,1	13,9	8,2	13,9	5,32	-0,39	11,03	-15	16
1	119	240	129	261	7,9	14,4	7,8	14,3	5,33	-0,38	11,04	-16	15
3	125	246	137	268	8,1	14,6	8,2	14,6	5,35	-0,36	11,06	-18	13
5	126	245	137	267	8,2	14,6	8,2	14,5	5,36	-0,35	11,07	-20	11
6	124	238	135	260	8	14,2	8,0	14,2	5,37	-0,34	11,08	-21	10
8	126	244	137	266	8,2	14,5	8,2	14,5	5,39	-0,33	11,1	-23	8
10	124	233	137	243	8	14,1	8,2	14,1	5,4	-0,32	11,11	-25	6
12	126	213	135	232	8,2	13,5	8,0	13,5	5,41	-0,3	11,12	-26,5	4,5
13	126	226	137	248	8,2	14,1	8,2	14,1	5,43	-0,29	11,14	-28	0,1
16	120	212	130	232	8	13,4	7,9	13,5	5,45	-0,26	11,16	-31	0

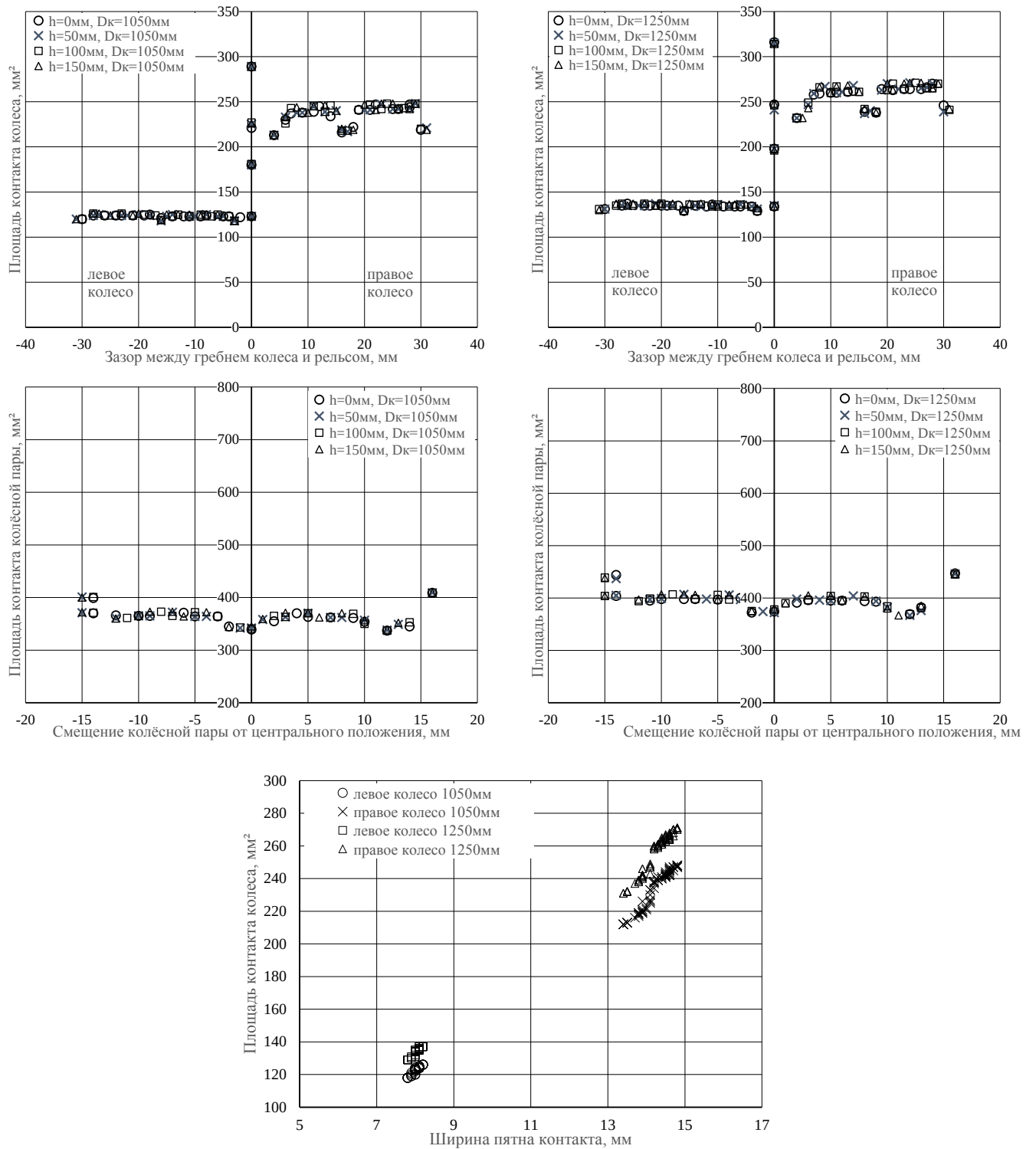


Рисунок А.3 – Геометрические параметры контакта колеса с рельсом
(колёса – новые, левый рельс – новый, правый рельс – изношенный)

Таблица А.4 – Геометрические параметры положений колёсной пары в колее (колёса – новые, левый рельс – изношенный, правый рельс – новый)

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм						
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Прямая, h=0 мм													
-14	212	120	232	131	13,4	8	13,5	8,0	-0,06	-5,77	5,65	0	30
-13	230	127	256	138	14	8,2	14,1	8,2	-0,04	-5,75	5,67	-0,1	28,5
-12	219	125	247	137	13,9	8,1	14,0	8,1	-0,03	-5,74	5,68	-2,5	27,5
-10	213	124	232	136	13,5	8,1	13,5	8,1	-0,02	-5,73	5,69	-4	26
-9	231	124	242	136	14,1	8,1	13,9	8,1	-0,01	-5,72	5,71	-5,5	24,5
-7	235	124	256	136	14,1	8,1	14,1	8,1	0,01	-5,71	5,72	-7,5	22,5
-5	236	124	262	138	14,2	8,1	14,6	8,2	0,02	-5,69	5,73	-9	21
-3	236	124	258	136	14,2	8,1	14,2	8,1	0,03	-5,68	5,74	-11	19
-2	237	124	259	136	14,3	8,1	14,3	8,1	0,05	-5,67	5,76	-12	18
0	237	119	259	129	14,3	7,9	14,3	7,8	0,06	-5,65	5,77	-14	16
2	216	127	239	135	13,6	8,2	13,8	8,0	0,08	-5,64	5,79	-16	14
4	225	124	238	135	14	8,1	13,8	8,0	0,09	-5,63	5,8	-17,5	12,5
6	239	124	261	135	14,5	8,1	14,4	8,0	0,1	-5,61	5,81	-19,5	10,5
7	239	124	261	135	14,5	8,1	14,4	8,0	0,11	-5,6	5,82	-20,5	9,5
9	240	124	262	135	14,6	8,1	14,6	8,0	0,13	-5,59	5,84	-22,5	7,5
11	240	124	262	135	14,6	8,1	14,6	8,0	0,14	-5,58	5,85	-24,5	5,5
12	240	123	262	135	14,6	8	14,6	8,0	0,15	-5,56	5,86	-25,5	4,5
14	241	123	263	129	14,6	8	14,6	7,8	0,17	-5,55	5,88	-27,5	0,1
16	219	118	240	129	13,9	7,8	13,9	7,8	0,19	-5,53	5,9	-30	0
Кривая, возвышение правого рельса h=50 мм													
-14	213	120	232	131	13,4	8	13,5	8,0	1,74	-3,98	7,45	0	30
-12	223	127	258	138	14,1	8,2	14,2	8,2	1,76	-3,96	7,47	-0,1	28
-12	215	125	244	136	13,6	8,1	14,1	8,1	1,76	-3,95	7,47	-2,5	27,5
-10	215	125	232	136	13,6	8,1	13,5	8,1	1,77	-3,94	7,49	-4	26
-8	235	124	254	138	14,2	8,1	14,1	8,2	1,79	-3,93	7,5	-6	24
-7	235	124	257	136	14,2	8,1	14,1	8,1	1,8	-3,91	7,51	-7	23
-5	236	124	257	136	14,2	8,1	14,1	8,1	1,81	-3,9	7,52	-9	21
-4	241	127	258	136	14,6	8,2	14,2	8,1	1,83	-3,89	7,54	-10,5	19,5
-2	237	124	263	139	14,3	8,1	14,6	8,2	1,84	-3,87	7,55	-12	18
0	238	119	259	129	14,3	7,9	14,3	7,8	1,85	-3,86	7,56	-14	16
2	218	124	239	135	13,7	8,1	13,8	8,0	1,86	-3,85	7,57	-16	14
4	226	127	238	135	14,1	8,2	13,8	8,0	1,88	-3,84	7,59	-17,5	12,5
5	239	124	261	135	14,4	8,1	14,4	8,0	1,89	-3,83	7,6	-19	11
7	239	124	266	138	14,4	8,1	14,6	8,2	1,9	-3,81	7,61	-21	9
8	240	124	261	135	14,5	8,1	14,4	8,0	1,92	-3,8	7,63	-22	8
10	240	124	262	135	14,5	8,1	14,5	8,0	1,93	-3,78	7,64	-24	6
12	240	123	262	135	14,5	8	14,5	8,0	1,94	-3,77	7,65	-25,5	4,5
13	241	119	263	129	14,6	7,9	14,6	7,8	1,95	-3,76	7,66	-27	0,1
16	220	118	239	129	13,8	7,8	13,8	7,8	1,98	-3,73	7,69	-30	0

Продолжение таблицы А.4

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм			левое колесо	правое колесо	левый гребень	правый гребень
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Кривая, возвышение правого рельса h=100 мм													
-14	213	120	232	131	13,4	7,9	13,5	8,0	3,52	-2,19	9,23	0	30
-12	235	127	258	138	14,1	8,2	14,2	8,2	3,54	-2,17	9,25	-0,1	28
-12	223	125	247	136	14	8,1	14,1	8,1	3,54	-2,17	9,25	-2	28
-10	214	127	232	139	13,5	8,2	13,5	8,2	3,56	-2,15	9,27	-4	26
-8	229	124	246	136	14	8,1	13,9	8,1	3,57	-2,14	9,28	-6	24
-6	240	127	261	138	14,5	8,2	14,4	8,2	3,59	-2,13	9,3	-8	22
-5	236	124	257	136	14,2	8,1	14,1	8,1	3,6	-2,12	9,31	-9	21
-3	236	124	263	138	14,2	8,1	14,6	8,2	3,61	-2,1	9,32	-11	19
-1	242	127	259	136	14,6	8,2	14,3	8,1	3,62	-2,09	9,33	-13	17
0	238	118	259	130	14,3	7,8	14,3	7,9	3,63	-2,08	9,35	-14	16
2	217	127	238	138	13,7	8,2	13,8	8,2	3,65	-2,06	9,36	-16	14
4	221	124	239	135	13,9	8,1	13,8	8,0	3,66	-2,05	9,37	-17,5	12,5
6	239	124	266	138	14,3	8,1	14,6	8,2	3,68	-2,04	9,39	-19,5	10,5
7	244	126	261	135	14,6	8,1	14,4	8,0	3,69	-2,02	9,4	-21	9
9	240	124	262	135	14,5	8,1	14,5	8,0	3,7	-2,01	9,41	-22,5	7,5
11	240	124	267	138	14,5	8,1	14,7	8,2	3,72	-2	9,43	-24,5	5,5
12	241	123	262	135	14,5	8	14,5	8,0	3,73	-1,99	9,44	-26	4
14	246	121	263	130	14,7	8	14,6	7,9	3,74	-1,97	9,45	-27,5	0,1
16	219	118	240	129	13,8	7,8	13,9	7,8	3,77	-1,95	9,48	-30	0
Кривая, возвышение правого рельса h=150 мм													
-15	212	121	231	131	13,4	7,9	13,4	8,0	5,32	-0,4	11,03	0	31
-13	234	127	254	138	13,8	8,2	14,1	8,2	5,35	-0,36	11,07	-0,1	29
-12	235	125	244	136	13,9	8,1	14,0	8,1	5,36	-0,35	11,07	-3	28
-10	239	127	232	139	14,2	8,2	13,5	8,2	5,37	-0,34	11,08	-5	26
-9	235	124	244	136	13,9	8,1	14,0	8,1	5,38	-0,33	11,09	-6	25
-7	240	127	262	139	14,4	8,2	14,4	8,2	5,4	-0,31	11,11	-8	23
-5	241	127	263	139	14,4	8,2	14,5	8,2	5,41	-0,3	11,12	-10	21
-4	237	124	258	136	13,9	8,1	14,2	8,1	5,42	-0,29	11,13	-11	20
-2	242	127	264	139	14,5	8,2	14,6	8,2	5,44	-0,27	11,15	-13	18
0	243	127	262	129	14,5	8,2	14,4	7,8	5,45	-0,26	11,16	-15	16
1	238	124	240	135	14	8,1	13,9	8,0	5,46	-0,25	11,17	-16	15
3	244	127	240	138	14,6	8,2	13,9	8,2	5,48	-0,23	11,19	-18	13
5	239	124	266	138	14,2	8,1	14,6	8,2	5,49	-0,22	11,2	-20	11
7	244	126	261	135	14,6	8,1	14,3	8,0	5,5	-0,21	11,21	-22	9
8	240	124	267	138	14,4	8,1	14,6	8,2	5,52	-0,2	11,23	-23	8
10	245	126	262	135	14,6	8,1	14,4	8,0	5,53	-0,18	11,24	-25	6
12	240	123	268	138	14,4	7,9	14,7	8,2	5,54	-0,17	11,25	-26,5	4,5
13	246	126	263	130	14,7	8,1	14,5	7,9	5,56	-0,16	11,27	-28	0,1
16	220	118	240	129	13,5	7,9	13,9	7,8	5,59	-0,13	11,3	-31	0

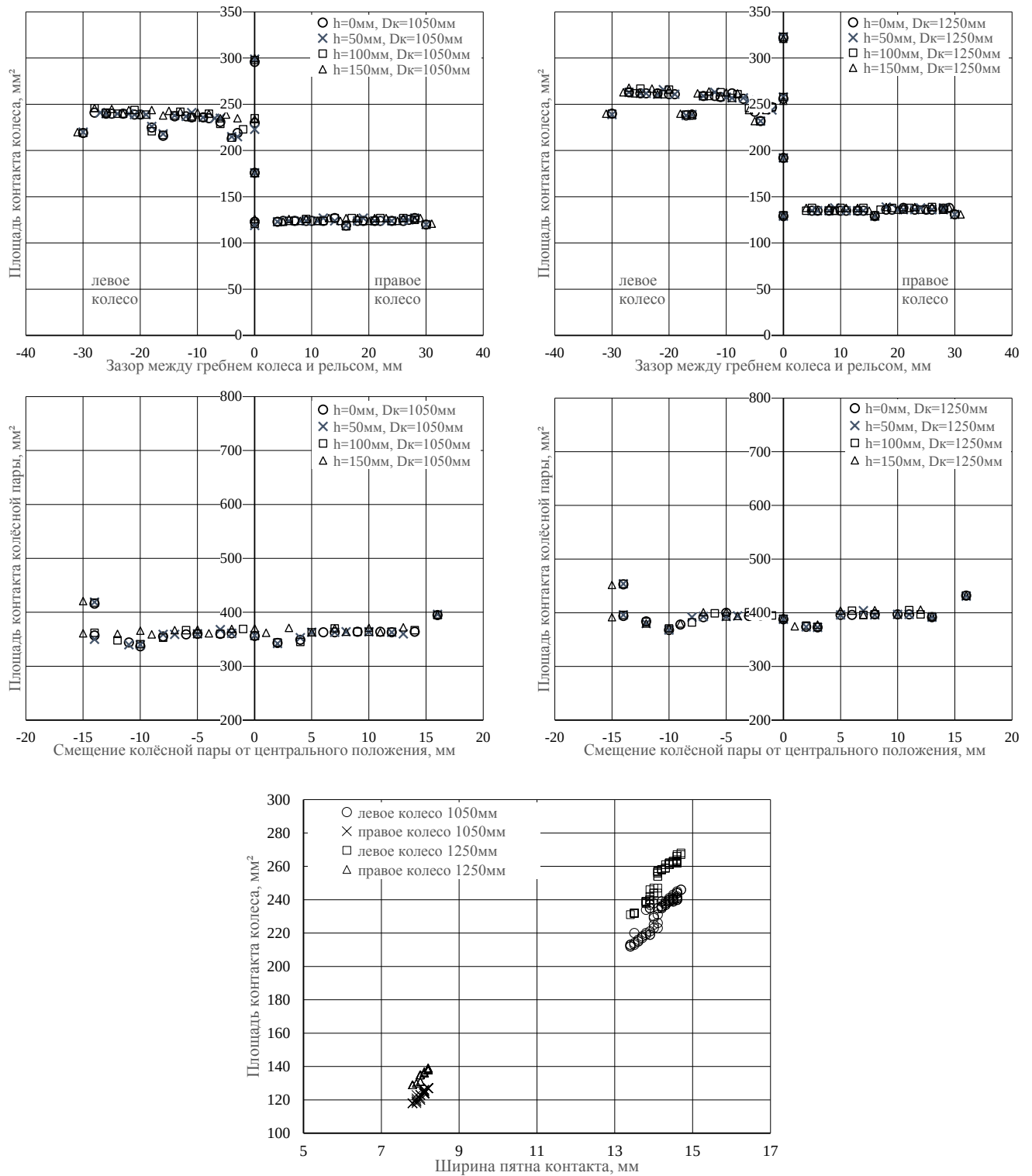


Рисунок А.4 – Геометрические параметры контакта колеса с рельсом
(колёса – новые, левый рельс – изношенный, правый рельс – новый)

Таблица А.5 – Геометрические параметры положений колёсной пары в колее
(колёса – изношены, левый рельс – новый, правый рельс – новый)

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм			левое колесо	правое колесо	левый гребень	правый гребень
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Прямая, h=0 мм													
-18	129	138	141	152	8,7	9,1	8,7	9,1	-0,09	-5,71	3,09	0	37
-16	139	149	154	157	9,2	9,6	9,4	9,5	-0,07	-5,44	3,38	-0,1	34,5
-15	144	139	157	153	9,6	9,3	9,4	9,3	-0,06	-5,3	2,88	-3,5	33,5
-13	152	158	170	176	10,2	10,7	10,5	10,7	-0,05	-5,15	2,11	-5,5	31,5
-10	169	157	181	182	11,5	10,5	11,3	11,0	-0,04	-4,82	2,02	-8	29
-9	182	163	195	195	12,7	11,4	12,4	12,0	-0,03	-4,57	1,94	-9,5	27,5
-6	224	190	236	230	15,7	13,5	15,2	14,1	-0,03	-4,33	2,41	-12	25
-4	282	233	293	271	19,5	16,3	18,7	16,6	-0,02	-4,16	1,76	-14	23
-3	379	318	453	384	24,3	21	25,2	23,0	-0,01	-3,71	1,67	-15,5	21,5
0	439	438	480	479	25,7	25,6	25,8	25,6	0	-2,87	2,77	-18	19
2	434	440	420	463	25,3	25,7	24,1	25,4	0,01	-1,68	3,17	-20	17
4	277	334	311	376	18,8	22,3	19,3	22,8	0,02	-1,89	4,04	-22	15
7	214	257	231	238	15,1	18	14,2	15,3	0,03	-2,16	4,27	-24,5	12,5
8	173	198	217	220	12,2	13,9	13,3	14,1	0,03	-1,62	4,42	-26	11
10	161	178	190	190	11,2	12,4	11,5	11,9	0,04	-1,73	4,62	-28	9
12	157	151	179	168	10,5	10,2	10,7	10,4	0,05	-1,81	4,93	-30	7
15	146	151	162	166	9,7	10,2	9,8	10,1	0,06	-2,42	5,27	-32,5	4,5
17	140	142	158	157	9,3	9,5	9,6	9,5	0,07	-3,2	5,49	-34,5	0,1
19	137	129	152	141	9,1	8,7	9,1	8,6	0,1	-3,19	5,73	-37	0
Кривая, возвышение правого рельса h=50 мм													
-18	129	137	141	152	8,7	9,1	8,7	9,1	1,71	-3,91	4,96	0	37
-16	141	148	154	163	9,3	9,5	9,3	9,5	1,72	-3,76	5,26	-0,1	35
-14	144	139	157	153	9,6	9,3	9,6	9,3	1,72	-3,57	4,61	-4	33
-13	151	156	165	172	10,2	10,6	10,2	10,7	1,73	-3,31	3,97	-5	32
-10	167	157	183	184	11,4	10,7	11,4	11,0	1,75	-3,05	3,8	-8	29
-8	186	165	203	204	13	11,6	13,0	12,4	1,76	-2,73	3,69	-10	27
-6	210	181	230	225	14,8	12,9	14,7	13,8	1,76	-2,57	4,2	-12	25
-4	286	236	314	284	19,7	16,4	19,8	17,4	1,77	-2,35	3,54	-14	23
-2	378	317	415	335	24,3	21	24,3	20,7	1,78	-2,19	3,6	-16	21
0	439	438	480	479	25,7	25,6	25,8	25,6	1,79	-1,09	4,56	-18	19
2	437	440	433	467	25,4	25,7	24,4	25,5	1,8	-0,66	4,94	-20	17
4	301	361	320	392	20,1	23,7	19,8	23,6	1,8	-0,17	5,8	-22	15
7	194	228	239	249	13,7	16,1	14,8	16,0	1,81	-0,5	6,08	-25	12
8	172	197	212	215	12,2	13,8	13,0	13,8	1,82	-0,15	6,23	-26	11
10	161	179	194	195	11,2	12,4	11,8	12,4	1,83	-0,08	6,38	-28	9
12	157	154	180	167	10,5	10,2	10,8	10,2	1,84	-0,75	6,72	-30	7
14	150	153	164	167	9,9	10,1	9,9	10,2	1,85	-0,55	6,94	-32	5
17	142	145	156	158	9,3	9,5	9,4	9,5	1,86	-1,41	7,18	-34,5	0,1
19	137	130	152	141	9,1	8,7	9,1	8,6	1,89	-1,46	7,5	-37	0

Продолжение таблицы А.5

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм			левое колесо	правое колесо	левый гребень	правый гребень
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Кривая, возвышение правого рельса h=100 мм													
-18	130	137	141	152	8,7	9,1	8,7	9,1	3,49	-2,12	6,74	0	36,5
-16	140	149	154	163	9,3	9,6	9,3	9,5	3,5	-1,9	7,06	-0,1	35
-15	143	139	157	153	9,6	9,3	9,6	9,3	3,51	-1,8	6,45	-3	33,5
-13	156	160	170	175	10,5	10,7	10,5	10,5	3,52	-1,47	6,82	-5	31,5
-10	169	157	185	185	11,5	10,6	11,5	11,2	3,53	-1,15	5,57	-7,5	29
-9	180	162	197	196	12,5	11,3	12,5	12,1	3,54	-1	5,51	-9	27,5
-7	211	182	231	227	14,9	12,9	14,7	14,0	3,55	-0,78	5,99	-11	25,5
-4	300	270	308	281	20	16,3	19,5	17,2	3,56	-0,57	5,32	-13,5	23
-1	426	396	466	430	25,3	24,3	25,2	24,3	3,57	-0,14	5,21	-16,5	20
0	439	438	480	477	25,7	25,6	25,7	25,4	3,57	-0,7	6,33	-17,5	19
2	436	440	473	481	25,4	25,7	25,5	25,7	3,58	-1,28	6,5	-19	17,5
4	297	357	315	384	19,4	23,5	19,5	23,2	3,59	-1,7	7,6	-21,5	15
7	196	232	240	250	13,9	16,2	14,9	16,2	3,6	-1,43	7,86	-24	12,5
9	175	201	214	217	12,4	14,1	13,2	13,9	3,61	-1,95	8	-26	10,5
11	160	176	192	191	11	12,2	11,6	12,0	3,61	-1,28	8,2	-28	8,5
13	157	151	179	164	10,5	10,2	10,7	10,2	3,62	-1,2	8,51	-30	6,5
15	149	153	163	166	9,9	10,4	9,8	10,4	3,64	-1,23	8,83	-32	4,5
17	141	145	155	158	9,3	9,6	9,3	9,5	3,65	-0,42	9,05	-34	0,1
19	138	129	152	141	9,1	8,7	9,1	8,7	3,67	-0,41	9,28	-36,5	0
Кривая, возвышение правого рельса h=150 мм													
-18	130	137	141	152	8,7	9,1	8,7	9,1	5,31	-0,31	8,56	0	37
-16	140	150	154	159	9,3	9,7	9,4	9,4	5,32	-0,11	8,81	-0,1	34,5
-14	143	139	158	154	9,5	9,3	9,7	9,4	5,33	-0,03	8,25	-4	33
-12	154	158	164	170	10,3	10,7	10,1	10,6	5,34	-0,3	7,56	-6	31
-10	161	157	171	182	11,1	10,6	10,8	10,9	5,35	-0,46	7,42	-8	29
-8	180	162	195	196	12,5	11,3	12,1	11,9	5,36	-0,82	7,33	-10	27
-6	209	181	225	222	14,7	12,8	14,5	13,6	5,36	-1,02	7,24	-12	25
-4	270	223	288	269	18,7	15,7	18,3	17,0	5,37	-1,21	7,73	-14	23
-2	415	366	414	334	25,2	23,4	24,3	20,6	5,38	-1,69	7,24	-16,5	20,5
0	440	437	480	478	25,7	25,4	25,7	25,4	5,39	-2,49	8,13	-18	19
2	436	440	477	480	25,3	25,7	25,3	25,7	5,4	-2,68	8,31	-20	17
4	306	367	327	403	20,4	23,9	20,2	24,0	5,4	-3,56	9,39	-22	15
7	202	241	251	265	14,3	17	15,4	16,4	5,41	-3,27	9,64	-25	12
9	173	198	223	228	12,2	13,9	13,7	14,7	5,42	-3,79	9,8	-26,5	10,5
11	160	176	199	198	11	12,2	12,4	12,6	5,43	-3,71	9,98	-28,5	8,5
12	157	153	180	167	10,5	10,3	10,9	10,1	5,44	-3,59	10,32	-30	7
14	154	154	169	168	10,3	10,3	10,2	10,3	5,45	-3,17	10,6	-32	5
16	139	147	153	160	9,3	9,6	9,3	9,7	5,46	-2,43	10,81	-34	0,1
19	138	129	152	141	9,1	8,7	9,1	8,7	5,49	-2,22	11,1	-37	0

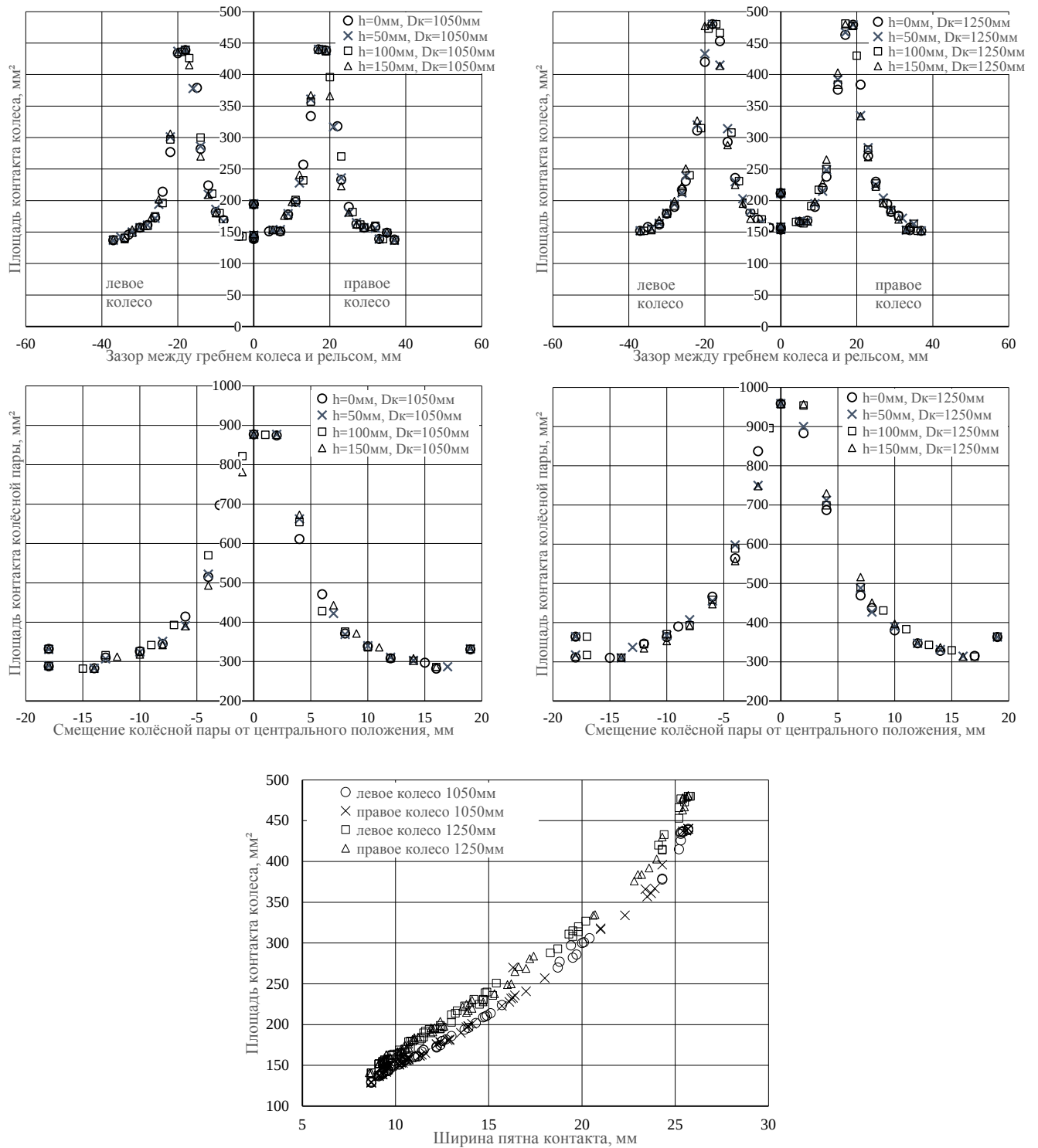


Рисунок А.5 – Геометрические параметры контакта колеса с рельсом
(колёса – изношены, левый рельс – новый, правый рельс – новый)

Таблица А.6 – Геометрические параметры положений колёсной пары в колее
(колёса – изношены, левый рельс – изношенный, правый рельс – изношенный)

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм						
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Прямая, h=0 мм													
-25	254	129	273	140	15,9	8,4	15,7	8,4	-0,13	-5,89	5,06	0	50
-23	299	138	316	151	18,7	8,7	17,8	8,8	-0,1	-5,71	4,81	-0,1	47,5
-20	296	139	326	152	18,1	8,8	18,6	8,9	-0,09	-4,97	4,04	-5	45
-17	355	139	388	151	21,1	8,8	21,2	8,8	-0,06	-4,87	4,05	-8	42
-15	362	140	394	152	21,5	8,9	21,5	8,9	-0,05	-4,47	3,25	-10,5	39,5
-12	308	139	327	151	19	8,8	18,9	8,8	-0,04	-3,47	3,36	-13,5	36,5
-9	356	139	376	152	21,2	8,8	20,9	8,9	-0,03	-3,45	2,49	-16	34
-6	357	142	390	159	21,3	9,3	21,3	9,4	-0,02	-2,58	2,1	-19	31
-3	327	148	346	177	19,9	10,2	19,6	10,7	-0,01	-2,2	1,93	-22	28
0	192	213	225	228	12,8	13,9	13,4	13,6	0	-1,76	1,76	-25	25
2	156	296	194	277	10,8	17,3	11,7	16,0	0	-2,11	1,77	-27	23
5	141	356	165	386	9,4	19,7	9,9	20,5	0,01	-1,79	2,83	-30	20
8	139	359	153	392	8,9	20,7	8,9	21,4	0,02	-2,4	3,34	-33	17
11	139	361	151	326	8,9	21,3	8,8	19,0	0,04	-2,76	3,43	-36	14
13	139	365	151	392	8,9	21,6	8,8	21,4	0,05	-3,12	3,88	-38	12
16	138	362	151	395	8,7	21,5	8,8	21,5	0,06	-3,48	4,74	-41	9
18	138	306	151	341	8,7	18,7	8,8	19,5	0,07	-4,27	4,96	-43	7
21	136	313	149	351	8,7	19,5	8,7	19,9	0,1	-4,31	5,68	-46	0,1
25	129	246	141	270	8,5	15,4	8,5	15,5	0,14	-5,07	5,96	-50	0
Кривая, возвышение правого рельса h=50 мм													
-24	249	129	269	141	15,6	8,4	15,5	8,5	1,66	-4,16	6,94	0	49
-23	270	138	295	151	16,9	8,8	16,9	8,8	1,68	-3,93	6,27	-0,1	47,5
-20	300	138	327	151	18,9	8,8	18,9	8,8	1,7	-3,18	5,87	-4	45
-17	350	139	383	152	21,1	8,8	21,1	8,8	1,72	-3,16	5,45	-7	42
-14	361	140	392	152	21,5	8,8	21,4	8,8	1,74	-2,33	5,56	-10	39
-11	313	139	341	153	19,6	8,8	19,6	8,8	1,75	-1,68	4,73	-13	36
-8	337	139	369	153	20	8,8	20,0	8,8	1,76	-1,66	4,32	-16	33
-5	357	144	392	158	21,2	9,8	21,4	9,3	1,77	-1,25	3,92	-19	30
-3	341	143	373	173	20,7	9,3	20,7	10,4	1,78	-0,09	3,75	-21	28
0	226	183	241	218	14,5	12,4	14,3	12,9	1,79	-0,09	4,07	-24	25
3	159	286	193	283	11	17	11,6	16,2	1,79	-0,46	3,56	-27	22
6	141	356	163	390	9,4	20,8	9,7	20,8	1,8	-0,16	4,66	-30	19
8	141	360	155	393	9,4	21,5	9,0	21,3	1,81	-1,54	4,69	-32	17
11	139	305	153	333	8,8	19	8,8	19,0	1,82	-0,88	5,22	-35	14
13	139	329	152	360	8,8	20,1	8,8	20,5	1,83	-1,7	5,23	-37	12
16	138	360	151	395	8,7	21,5	8,8	21,5	1,85	-1,68	6,5	-40	9
19	137	333	151	345	8,7	20,5	8,8	19,7	1,86	-2	6,74	-43	6
22	137	318	149	348	8,7	19,7	8,7	20,1	1,88	-2,45	6,76	-46	0,1
25	129	250	141	273	8,5	15,6	8,5	15,6	1,92	-3,24	7,7	-49	0

Продолжение таблицы А.6

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм			левое колесо	правое колесо	левый гребень	правый гребень
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Кривая, возвышение правого рельса h=100 мм													
-25	244	130	268	142	15,3	8,5	15,4	8,5	3,44	-2,5	8,58	0	49,5
-23	276	138	294	148	17,2	8,8	17,2	8,8	3,47	-2,14	8,01	-0,1	47,5
-20	299	138	326	151	18,9	8,8	18,8	8,8	3,49	-1,39	7,64	-4,5	45
-17	345	139	378	152	21	8,8	21,0	8,8	3,51	-1,37	8,18	-7,5	42
-14	359	139	392	152	21,4	8,8	21,4	8,8	3,52	-0,53	7,33	-10,5	39
-11	307	139	334	152	19,1	8,8	18,9	8,8	3,54	-0,11	6,48	-13,5	36
-9	340	139	374	152	20,8	8,8	20,8	8,8	3,55	-0,12	6,09	-15,5	34
-6	358	144	392	158	21,2	9,3	21,4	9,3	3,56	-0,91	5,71	-18,5	31
-3	334	145	352	177	19,8	10	19,8	10,6	3,57	-1,35	5,51	-21,5	28
0	215	190	225	222	14	12,7	13,9	13,2	3,58	-1,82	5,34	-24,5	25
2	158	291	192	287	10,9	17,2	11,5	16,4	3,58	-1,97	5,35	-26,5	23
5	141	356	163	389	9,4	20,7	9,7	20,8	3,59	-1,76	6,44	-29,5	20
8	141	360	155	394	9,4	21,3	9,1	21,5	3,6	-1,28	6,82	-32,5	17
11	138	301	152	328	8,7	19,1	8,8	19,1	3,61	-0,47	7,01	-35,5	14
13	139	334	152	368	8,8	20,7	8,8	20,7	3,62	-0,47	7,02	-37,5	12
16	138	361	151	394	8,7	21,5	8,7	21,5	3,64	-0,12	8,28	-40,5	9
19	137	304	150	331	8,7	19,6	8,7	19,6	3,65	-0,3	8,53	-43,5	6
22	137	323	149	354	8,7	19,6	8,7	19,6	3,67	-0,68	8,55	-46,5	0,1
25	129	250	141	273	8,5	15,7	8,5	15,7	3,71	-1,45	9,56	-49,5	0
Кривая, возвышение правого рельса h=150 мм													
-24	242	130	267	141	15,2	8,5	15,4	8,5	5,24	-0,69	10,42	0	49,5
-22	273	138	302	151	17,1	8,8	17,2	8,8	5,29	-0,33	10,28	-0,1	47,5
-20	305	138	329	151	19,6	8,8	18,9	8,8	5,3	-0,42	9,95	-4,5	45
-16	344	138	385	151	20,9	8,8	21,2	8,8	5,32	-0,44	9,07	-8	41,5
-14	359	139	393	152	21,4	8,8	21,5	8,8	5,34	-0,87	8,7	-10	39,5
-11	302	138	342	153	18,9	8,8	19,4	8,8	5,35	-1,93	8,3	-13	36,5
-8	340	139	380	153	19,7	8,8	21,0	8,8	5,36	-1,94	8,39	-16	33,5
-5	358	144	392	158	21,2	9,8	21,4	9,3	5,37	-2,32	8,04	-19	30,5
-3	341	143	370	174	20,8	9,3	20,0	10,4	5,38	-3,14	7,34	-21	28,5
0	240	175	246	213	15,1	11,9	14,5	12,7	5,39	-3,63	7,68	-24	25,5
3	159	283	195	282	11	16,9	11,7	16,2	5,4	-3,26	7,16	-27	22,5
6	155	335	164	388	9,5	20,5	9,8	20,6	5,4	-3,6	8,21	-30	19,5
8	141	359	154	393	9	21,3	9,0	21,3	5,41	-3,08	8,26	-32	17,5
11	138	301	152	327	8,8	19,1	8,8	19,1	5,42	-2,67	8,82	-35	14,5
14	138	361	152	363	8,8	21,5	8,8	20,6	5,44	-2,33	8,84	-37,5	12
17	138	361	151	395	8,8	21,5	8,8	21,5	5,45	-1,48	10,1	-40,5	9
20	137	302	150	344	8,7	19,5	8,7	19,5	5,47	-1,55	10,35	-43,5	6
22	137	320	149	353	8,7	19,6	8,7	20,0	5,48	-1,15	10,37	-46	0,1
26	129	250	141	273	8,5	15,6	8,5	15,6	5,52	-0,38	11,3	-49,5	0

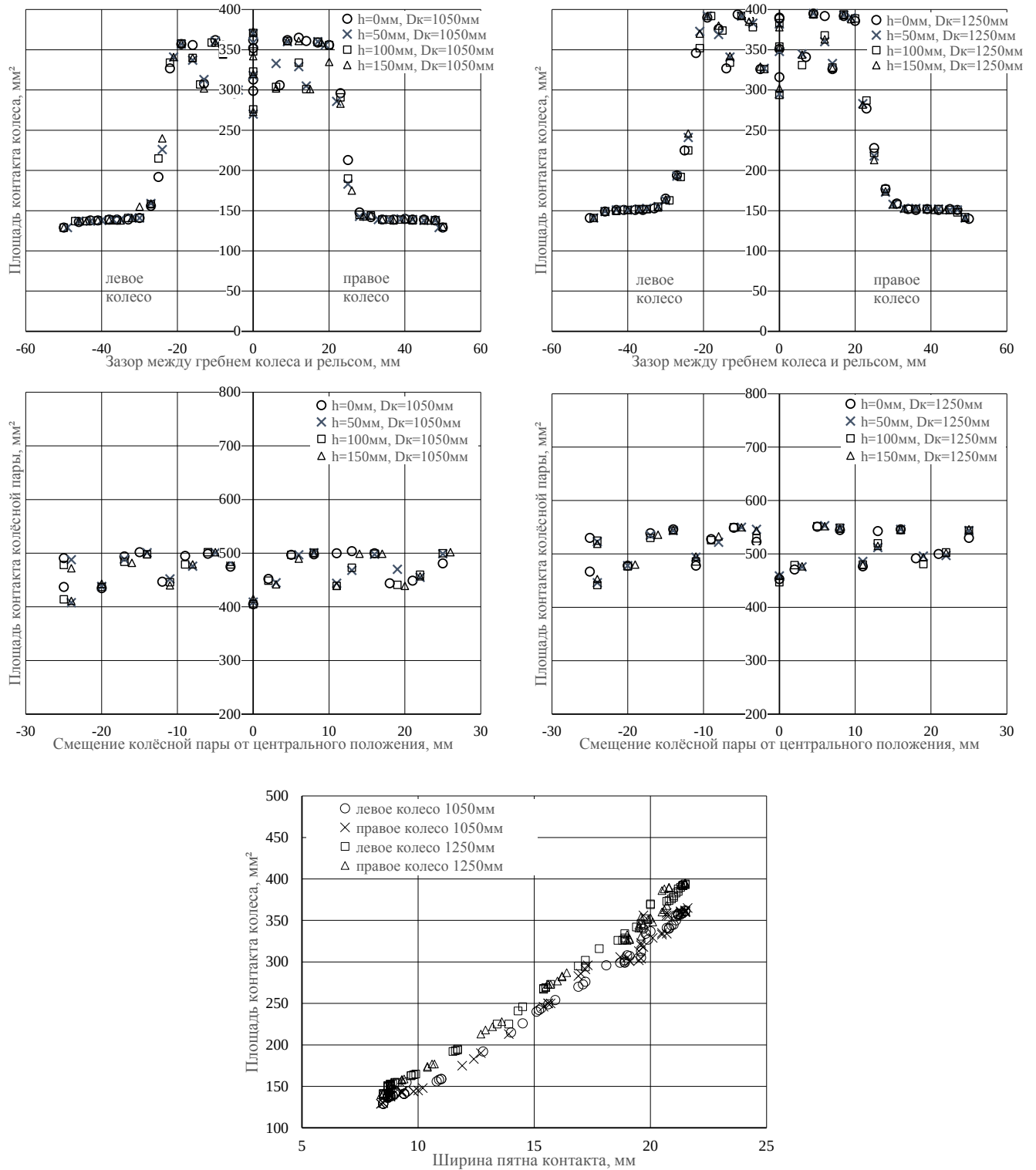


Рисунок А.6 – Геометрические параметры контакта колеса с рельсом
(колёса – изношены, левый рельс – изношенный, правый рельс – изношенный)

Таблица А.7 – Геометрические параметры положений колёсной пары в колее (колёса – изношены, левый рельс – новый, правый рельс – изношенный)

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм			левое колесо	правое колесо	левый гребень	правый гребень
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Прямая, h=0 мм													
-21	128	129	140	140	8,5	8,5	8,4	8,4	-0,17	-5,8	4,24	0	43
-19	137	139	152	152	9	8,8	9,2	8,8	-0,15	-5,65	3,55	-0,1	41
-17	145	140	160	153	9,5	8,8	9,6	8,8	-0,13	-5,29	3,69	-4	39
-15	146	140	161	152	9,6	8,8	9,6	8,8	-0,12	-5,01	2,93	-6,5	36,5
-13	171	139	186	154	11,8	8,8	11,7	8,8	-0,11	-4,69	2,57	-8,5	34,5
-10	197	142	212	155	13,8	9,3	13,4	9,0	-0,1	-4,45	2,74	-11,5	31,5
-8	234	142	276	163	16,4	9,3	17,7	9,7	-0,09	-4,25	1,98	-13	30
-5	388	152	453	195	24,3	10,5	25,2	11,7	-0,08	-3,73	1,77	-16	27
-3	439	182	480	226	25,7	12,3	25,8	13,5	-0,07	-2,89	1,7	-18	25
0	402	298	381	322	24,6	17,4	22,8	17,7	-0,06	-1,92	1,7	-21	22
3	223	357	301	383	15,7	21,2	18,4	20,3	-0,06	-1,82	2,79	-23,5	19,5
5	185	357	218	392	13,2	21,2	13,6	21,3	-0,05	-1,7	3,18	-26	17
7	165	343	195	349	11,6	19,8	11,9	20,1	-0,04	-1,79	3,36	-28	15
10	150	352	179	345	10,5	20,9	10,6	19,4	-0,03	-1,91	3,37	-31	12
12	141	364	158	400	9,4	21,6	9,5	21,7	-0,02	-2,7	4,37	-32,5	10,5
14	147	364	168	395	10,1	21,6	10,1	21,5	-0,01	-2,95	4,33	-35	8
16	146	300	166	327	9,6	19,2	9,8	19,3	0	-2,69	4,88	-37	6
19	146	332	166	358	9,6	19,7	9,8	20,3	0,02	-2,92	5,24	-40	0,1
22	130	255	143	281	8,7	16,2	8,6	16,1	0,06	-3,53	5,78	-43	0
Кривая, возвышение правого рельса h=50 мм													
-21	128	129	140	141	8,5	8,5	8,5	8,5	1,61	-4,05	6,08	0	43
-20	136	139	149	152	9	8,8	9,0	8,8	1,64	-3,88	5,38	-0,1	41,5
-17	144	140	158	153	9,5	9,1	9,6	8,8	1,65	-3,63	5,54	-4	39
-15	149	140	162	153	9,6	9,1	9,6	8,8	1,67	-3,22	4,73	-6	37
-13	169	139	184	154	11,5	8,8	11,5	8,8	1,68	-2,94	4,91	-8	35
-10	190	140	207	155	14	9,1	13,2	9,0	1,69	-2,67	4,54	-11	32
-7	261	141	288	165	15,3	9,4	18,4	9,8	1,7	-2,4	3,75	-14	29
-5	416	161	428	187	25,2	11,1	24,6	11,2	1,72	-1,94	3,6	-16,5	26,5
-3	439	198	478	243	25,7	13,1	25,5	14,4	1,72	-1,04	3,49	-18,5	24,5
0	376	319	391	313	23,6	19,8	23,5	17,1	1,73	-0,05	3,66	-21	22
3	265	375	285	390	18,2	21,6	17,4	21,2	1,74	-0,09	4,64	-24	19
5	190	340	238	389	14	21,2	14,7	20,8	1,74	-0,5	4,89	-25,5	17,5
7	160	310	193	340	11,1	19,6	11,8	19,7	1,75	-0,08	5,15	-28	15
9	150	295	181	329	9,6	18,3	10,9	19,2	1,76	-0,16	5,16	-30	13
12	143	365	157	398	9,4	21,5	9,5	21,6	1,77	-0,83	6,12	-33	10
14	152	363	167	395	10,6	21,2	10,1	21,5	1,78	-1,77	6,54	-35	8
16	151	299	166	331	10,2	19,2	9,7	19,6	1,79	-1,99	6,67	-37	6
19	151	315	166	348	10,2	19,7	9,7	19,9	1,8	-1,65	6,68	-40	0,1
22	131	258	144	284	8,5	16,2	8,5	16,2	1,84	-1,85	7,55	-43	0

Продолжение таблицы А.7

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм			левое колесо	правое колесо	левый гребень	правый гребень
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Кривая, возвышение правого рельса h=100 мм													
-21	128	129	139	141	8,5	8,4	8,5	8,4	3,41	-2,21	7,78	0	43,5
-19	139	140	151	152	9,2	8,8	9,2	8,8	3,43	-2,02	7,06	-0,1	41
-17	142	140	155	151	9,5	8,8	9,5	8,8	3,44	-1,77	6,88	-4	39,5
-14	147	140	160	153	9,5	8,8	9,6	8,8	3,46	-1,43	6,44	-7	36,5
-12	172	141	186	154	11,7	8,8	11,7	8,8	3,47	-1,11	6,64	-9	34,5
-10	193	142	209	155	13,5	9	13,4	9,0	3,48	-0,9	5,84	-11	32,5
-7	267	151	286	164	18,6	9,8	18,2	9,8	3,49	-0,61	5,95	-14	29,5
-4	328	165	413	184	24,2	11,2	24,3	11,0	3,5	-0,4	5,13	-17	26,5
-2	439	217	479	234	25,6	14,1	25,7	13,9	3,51	-0,76	4,88	-19	24,5
0	392	264	440	282	24,5	16,4	24,4	16,2	3,51	-1,87	4,89	-21	22,5
2	243	361	331	394	18,4	21,5	18,7	21,3	3,52	-1,68	6,29	-23	20,5
5	205	359	227	392	13,8	21,3	14,0	20,6	3,53	-1,37	6,36	-26	17,5
8	177	310	195	343	11,8	19,6	11,8	19,7	3,54	-0,58	6,94	-29	14,5
11	160	339	177	356	10,4	20,4	10,5	20,0	3,55	-0,87	6,95	-32	11,5
12	142	357	156	400	9,5	20,8	9,5	21,6	3,56	-0,85	7,55	-33	10,5
15	154	362	168	395	10,2	21,6	10,1	21,5	3,57	-1,1	8,35	-36	7,5
17	152	302	166	332	9,7	19,2	9,7	19,4	3,58	-0,21	8,46	-38	5,5
20	151	323	165	358	9,6	19,9	9,6	20,2	3,59	-0,45	9,17	-41	0,1
23	131	258	144	284	8,6	16,1	8,6	16,3	3,63	-0,34	9,36	-43,5	0
Кривая, возвышение правого рельса h=150 мм													
-22	128	129	140	140	8,5	8,5	8,6	8,4	5,22	-0,4	9,58	0	43,5
-20	136	139	140	152	9	8,8	8,6	8,8	5,24	-0,27	9,44	-0,1	41,5
-17	154	140	158	153	9,7	8,8	9,5	8,8	5,26	-0,08	8,63	-4,5	39
-15	156	140	160	153	10,2	8,8	9,5	8,8	5,27	-0,39	8,8	-7	36,5
-13	171	140	185	154	11,7	8,8	11,6	8,8	5,28	-0,69	7,98	-9	34,5
-10	192	144	213	155	13,3	9	13,7	9,0	5,29	-0,92	7,65	-11,5	32
-8	250	149	285	164	16,7	9,6	17,4	9,8	5,31	-1,19	7,29	-14	29,5
-5	391	171	404	182	25,6	11,2	23,8	10,9	5,32	-1,42	7,47	-16,5	27
-2	367	216	480	227	24,6	13,9	25,7	13,6	5,32	-2,56	6,7	-19,5	24
0	356	289	416	296	23,1	17,5	24,0	16,8	5,33	-3,51	6,71	-21,5	22
3	251	359	286	389	17,5	21,2	18,3	20,8	5,34	-3,14	8,23	-24,5	19
5	215	356	228	393	14,5	21	14,0	21,3	5,34	-2,64	8,13	-26	17,5
8	184	336	192	336	12,3	20,6	11,6	19,6	5,35	-2,99	8,75	-29	14,5
9	165	308	181	330	10,8	19,6	10,9	19,4	5,36	-3,35	8,76	-30,5	13
12	144	365	154	396	9,5	21,6	9,5	21,6	5,37	-2,68	9,35	-33	10,5
14	153	361	168	396	9,7	21,5	10,1	21,6	5,38	-2,91	10,18	-35,5	8
17	152	302	166	324	9,6	19,4	9,7	19,3	5,39	-2,68	10,28	-38	5,5
19	151	327	166	350	9,6	19,8	9,7	19,7	5,41	-1,92	10,29	-40,5	0,1
22	131	258	144	284	8,5	16,1	9,1	16,2	5,44	-1,61	11,17	-43,5	0

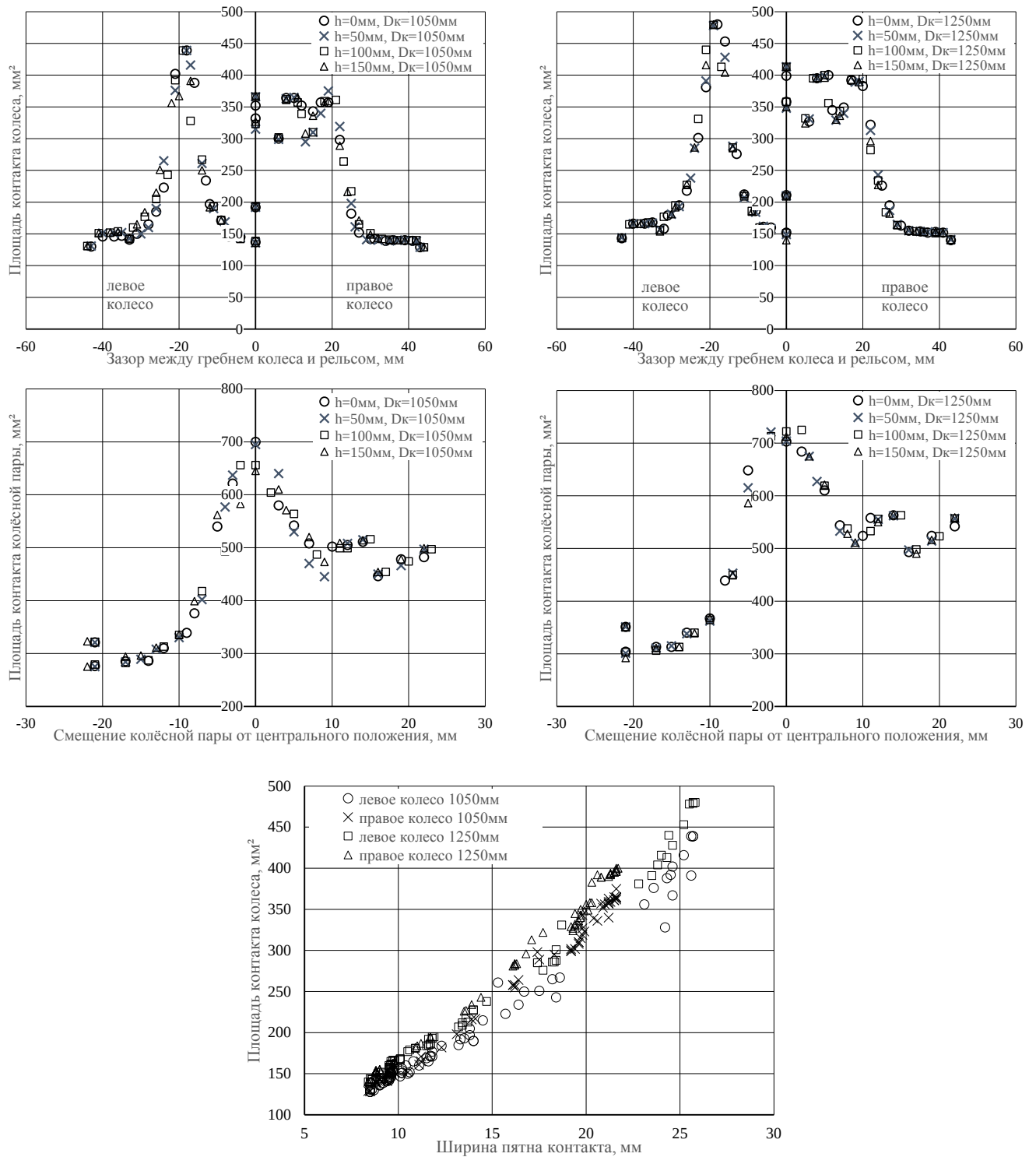


Рисунок А.7 – Геометрические параметры контакта колеса с рельсом
(колёса – изношены, левый рельс – новый, правый рельс – изношенный)

Таблица А.8 – Геометрические параметры положений колёсной пары в колее (колёса – изношены, левый рельс – изношенный, правый рельс – новый)

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм			левое колесо	правое колесо	левый гребень	правый гребень
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Прямая, h=0 мм													
-21	259	132	279	145	16,2	8,6	16,0	8,6	-0,06	-5,82	3,6	0	43
-20	289	150	320	165	17,9	9,5	18,1	9,6	-0,02	-5,64	3,04	-0,1	41,5
-17	300	151	342	167	19,2	9,6	19,7	10,1	-0,01	-4,89	3,41	-4	39
-15	330	152	339	167	19,5	9,6	19,5	10,1	0	-4,88	2,62	-6	37
-12	360	142	393	161	21,5	9,3	21,4	9,5	0,02	-4,61	3,28	-9	34
-10	345	157	396	162	21	10,3	21,5	9,6	0,03	-3,83	2,33	-11	32
-7	299	158	326	184	19	10,8	19,2	11,2	0,04	-3,39	2,08	-14	29
-4	356	171	391	215	21,2	12,9	21,3	13,2	0,05	-3,22	1,94	-17	26
-3	356	212	390	245	21,2	15	21,3	15,1	0,05	-2,59	2,45	-18	25
0	333	329	375	330	20,5	21,6	19,9	20,0	0,06	-2,57	1,59	-21	22
3	265	432	239	479	16,2	25,3	14,2	25,7	0,07	-1,7	2,77	-23,5	19,5
5	162	419	207	458	11,2	25,1	12,4	25,6	0,07	-2	3,47	-26	17
7	144	332	172	337	9,9	22,2	10,3	21,0	0,08	-1,67	4,07	-27,5	15,5
10	143	231	162	250	9,3	16,3	9,3	15,5	0,09	-1,83	4,3	-30,5	12,5
12	140	186	153	198	8,9	13	8,9	12,6	0,1	-2,86	4,54	-32,5	10,5
15	139	167	153	181	8,8	11,4	8,9	11,1	0,11	-2,7	4,77	-35,5	7,5
17	139	154	152	166	8,8	10,3	8,8	9,6	0,13	-3,03	5,23	-37,5	5,5
19	139	145	152	157	8,8	9,4	8,8	9,4	0,14	-3,36	5,5	-39,5	0,1
22	128	128	140	140	8,4	8,5	8,4	8,5	0,16	-4,25	5,77	-43	0
Кривая, возвышение правого рельса h=50 мм													
-22	259	134	277	146	16,2	8,6	15,9	8,6	1,73	-4,1	5,3	0	43
-20	305	151	319	165	18,5	9,4	17,8	9,6	1,77	-3,84	5,36	-0,1	41
-18	307	152	327	167	19,2	9,6	19,2	10,1	1,78	-3,1	5,18	-4,5	38,5
-15	340	152	355	167	20,8	9,6	20,4	10,1	1,8	-3,09	4,93	-7	36
-13	361	141	393	158	21,5	9,4	21,4	9,5	1,81	-2,79	4,99	-9	34
-11	349	155	396	164	21,1	10,3	21,6	9,5	1,82	-2,02	4,1	-11	32
-8	298	158	335	185	18,1	10,8	19,5	11,5	1,83	-1,6	3,87	-14	29
-5	358	176	391	212	21,3	12,5	21,3	13,1	1,84	-1,48	3,74	-17	26
-3	358	223	393	263	21,3	15,7	21,4	16,1	1,84	-1,1	3,63	-19	24
0	317	381	325	378	19,5	23,7	18,0	22,6	1,85	-0,31	3,71	-22	21
2	234	436	258	475	14,9	25,4	15,1	25,5	1,86	-0,1	4,56	-24	19
4	163	420	200	455	11,2	25,3	12,2	25,3	1,86	-0,3	5,26	-26	17
7	141	269	167	311	9,3	18,7	10,0	19,6	1,87	-0,11	5,95	-29	14
9	143	220	158	250	9,5	15,5	9,4	16,1	1,88	-0,27	6,1	-31	12
11	140	181	154	204	8,9	12,8	8,9	13,1	1,89	-1,06	6,32	-33	10
13	139	167	153	184	8,8	11,3	8,8	11,1	1,9	-0,87	6,54	-35	8
16	139	154	152	165	8,8	10,2	8,8	9,6	1,92	-1,24	6,92	-37,5	5,5
18	138	142	152	157	8,7	9,4	8,8	9,4	1,93	-2,06	7,22	-40	0,1
21	134	128	140	140	8,6	8,5	8,4	8,5	1,96	-2,28	7,58	-43	0

Продолжение таблицы А.8

Смещение, мм	Площадь контакта, мм²				Ширина контакта 2b, мм				Наклон колёс- ной пары γ, °	Угол кон- такта β, °		Зазор δ, мм	
	Dк=1050мм		Dк=1250мм		Dк=1050мм		Dк=1250мм			левое колесо	правое колесо	левый гребень	правый гребень
	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо	левое колесо	правое колесо					
Кривая, возвышение правого рельса h=100 мм													
-22	254	131	282	143	15,9	8,5	16,2	8,5	3,52	-2,32	7,23	0	44
-20	290	150	308	164	17,9	9,5	17,6	9,6	3,55	-2,06	7,19	-0,1	42
-18	306	151	330	165	18,7	9,9	19,2	9,6	3,57	-1,32	6,99	-4	40
-15	309	152	351	167	19,2	10	19,7	10,1	3,58	-1,3	6,21	-6,5	37,5
-13	330	150	393	160	19,8	9,5	21,4	9,5	3,59	-0,66	6,88	-9	35
-10	363	148	381	170	21,6	9,5	20,9	10,2	3,6	-0,43	5,92	-11,5	32,5
-7	345	162	331	190	21,2	10,8	19,6	11,5	3,61	-0,19	6,19	-14,5	29,5
-5	358	175	393	215	21,3	12,4	21,4	13,2	3,62	-0,32	5,52	-17	27
-2	359	216	385	360	21,4	15,2	21,1	19,8	3,63	-0,71	5,97	-19,5	24,5
0	326	351	380	463	19,5	22,7	20,3	21,4	3,64	-1,43	5,18	-21,5	22,5
2	260	433	268	470	15,9	25,3	15,6	25,0	3,64	-1,88	5,72	-23	21
5	163	420	204	471	11,2	25,2	12,2	25,5	3,65	-1,56	7,05	-26	18
7	142	308	180	350	9,3	20,9	10,4	17,0	3,66	-1,93	7,66	-28,5	15,5
9	143	228	160	254	9,7	16	9,5	16,4	3,67	-1,55	7,86	-30,5	13,5
12	139	180	153	199	8,8	12,5	8,9	12,7	3,68	-0,69	8,14	-33,5	10,5
14	139	166	153	187	8,8	11,3	8,9	11,4	3,69	-0,89	8,34	-35,5	8,5
17	139	151	152	165	8,8	9,9	8,8	9,6	3,71	-0,49	8,84	-38	6
19	139	144	152	158	8,8	9,3	8,8	9,3	3,72	-0,22	9,07	-40,5	0,1
23	129	128	141	140	8,4	8,5	8,5	8,5	3,76	-0,73	9,39	-44	0
Кривая, возвышение правого рельса h=150 мм													
-21	257	132	280	143	16,1	8,6	16,1	8,6	5,34	-0,44	9,16	0	43,5
-19	297	150	320	160	18,2	9,5	17,4	9,4	5,37	-0,24	8,44	-0,1	41,5
-17	305	151	332	166	19,2	9,6	19,5	9,6	5,38	-0,5	8,79	-4	39,5
-15	326	152	357	167	19,5	10	19,9	10,2	5,39	-0,51	8,55	-6,5	37
-13	360	147	393	161	21,5	9,4	21,4	9,6	5,4	-0,73	8,78	-8,5	35
-10	362	151	395	166	21,5	9,6	21,5	9,6	5,42	-1,59	7,74	-11,5	32
-7	298	158	326	187	19,2	10,8	19,2	11,4	5,43	-2	8,02	-14	29,5
-5	355	167	389	207	21,2	11,8	21,2	13,2	5,43	-2,01	7,36	-16	27,5
-3	358	205	393	254	21,2	14,5	21,4	15,7	5,44	-2,43	7,83	-18,5	25
0	335	319	378	320	20,4	21,1	20,4	19,5	5,45	-2,8	7,21	-21	22,5
3	226	437	275	487	14,5	25,5	15,3	25,8	5,46	-3,7	8,16	-24	19,5
5	166	426	215	480	11,4	25,4	12,8	25,2	5,46	-3,93	8,59	-26	17,5
7	144	328	174	358	9,9	22	10,5	22,0	5,47	-3,76	9,45	-28	15,5
10	144	224	164	240	9,9	15,8	9,3	15,6	5,48	-3,34	9,7	-30,5	13
12	139	181	154	206	8,9	12,6	9,0	12,7	5,49	-3,03	9,92	-33	10,5
14	139	167	153	185	8,9	11,8	8,8	11,3	5,5	-2,72	10,14	-35	8,5
17	139	153	152	167	8,9	10,2	8,8	10,2	5,52	-1,89	10,53	-37,5	6
20	139	143	151	156	8,9	9,3	8,8	9,3	5,53	-2	10,81	-40,5	0,1
23	129	128	141	140	8,5	8,5	8,5	8,4	5,57	-1,21	11,2	-43,5	0

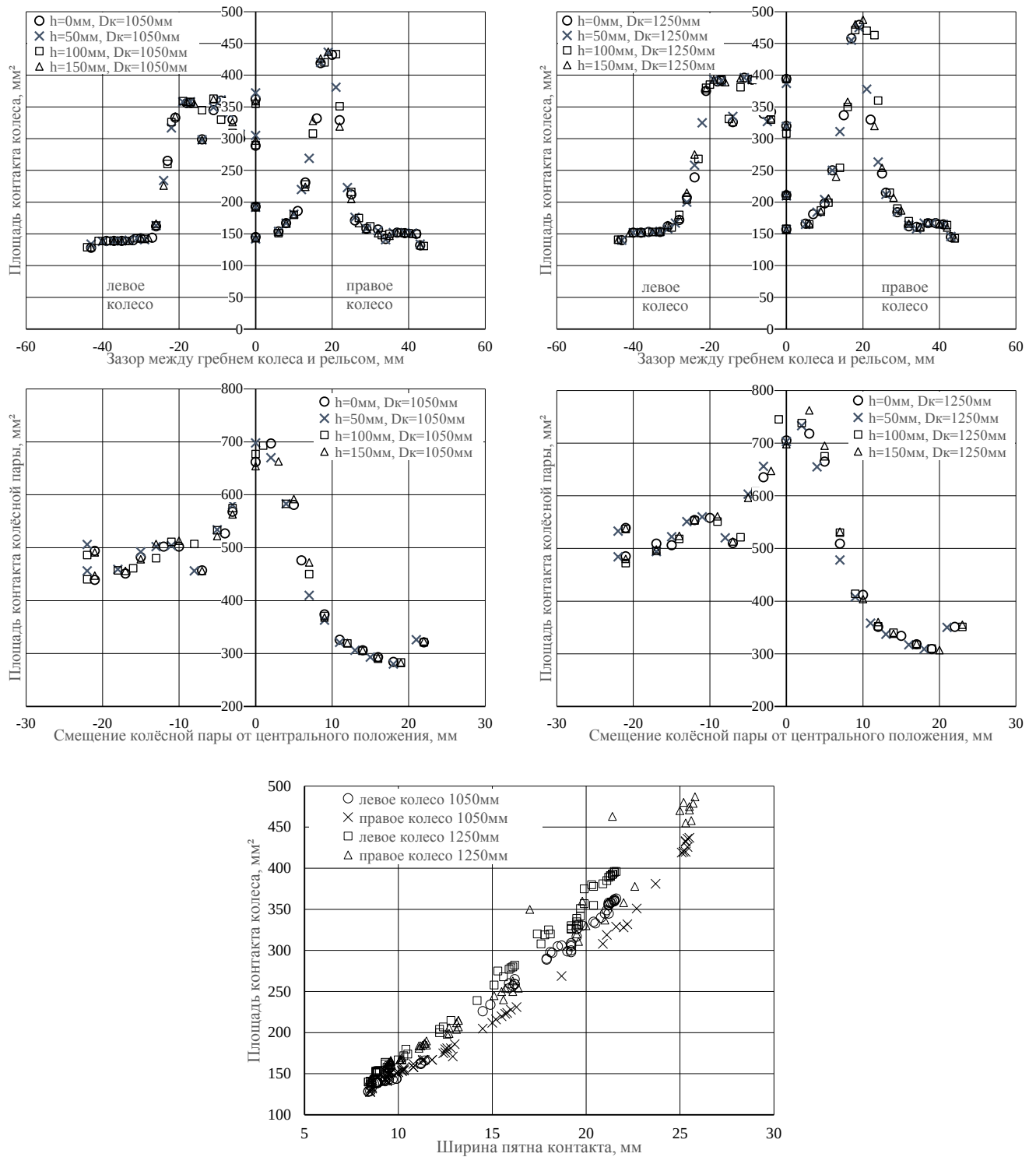


Рисунок А.8 – Геометрические параметры контакта колеса с рельсом
(колёса – изношены, левый рельс – изношенный, правый рельс – новый)

Приложение Б
(обязательное)
Акты результатов исследований

УТВЕРЖДАЮ

проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «Брянский государственный
технический университет»

к.т.н., доц. В.М. Сканцев



АКТ о внедрении

Настоящим подтверждаем, что материалы диссертации В.О. Корчагина «Улучшение тяговых качеств тепловозов воздействием постоянного магнитного поля на контакт трибосистемы колесо – рельс» внедрены в учебный процесс на кафедре «Подвижной состав железных дорог».

Результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов между стальными парами трения при воздействии магнитного поля, разработанные и изготовленные установки использованы при проведении занятий по дисциплинам «Теория и конструкция локомотивов», «Электрические передачи локомотивов». Результаты исследований опубликованы в учебном пособии «Тяговые приводы локомотивов: поиск и выбор инновационных решений».

Зав. кафедрой «ПСЖД»

ФГБОУ ВО «Брянский государственный
технический университет»

к.т.н., доц. Д.Я. Антипин



АКТ
ОПЫТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

« 14 » сентября 2017

Елец
город

Комиссия в составе:

председателя Главный инженер сервисного локомотивного депо «Елец»
должность, организация, фамилия, инициалы

Шосталь Е.Ю.

членов Старший мастер участка ТО-3, ТР-1 сервисного локомотивного депо
должность, организация, фамилия, инициалы

«Елец» Чернышов А.С.

Технолог 1 категории сервисного локомотивного депо «Елец» Чернышев Е.В.

старший преподаватель кафедры «Тяговый подвижной состав» РОАТ

Корчагин В.О.

провела опытные испытания индукторного устройства увеличения сцепления колёс локомотива с рельсами. Испытания выполнялись на пути № 11 сервисного локомотивного депо «Елец» с использованием тепловоза ЧМЭЗ-5008 путём пропускания магнитного потока через контакт колёс с рельсами.

При использовании индукторного устройства был выявлен прирост сцепления колёсной пары тепловоза ЧМЭЗ-5008 величиной 9...11 %.

Председатель комиссии

Шосталь Е.Ю.

подпись, расшифровка

Члены комиссии

Чернышов А.С.

подпись, расшифровка

Чернышев Е.В.

Корчагин В.О.

Приложение В
(обязательное)

Разложение профиля колеса в тригонометрический ряд Фурье

Определение коэффициентов Фурье.

$$\begin{aligned}
 a_o = \frac{1}{T} \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} z_m(y) dy = \frac{1}{T} \cdot & \left[\int_0^{0,57} (-26,502y) dy + \int_{0,57}^{2,25} (-2,89y-13,5) dy + \int_{2,25}^{4,96} (-1,611y-16,3) dy + \right. \\
 & + \int_{4,96}^{8,56} (-1,016y-19,3) dy + \int_{8,56}^{11,24} (-0,561y-23,2) dy + \int_{11,24}^{14,26} (-0,171y-27,6) dy + \int_{14,26}^{15,84} (0,056y-30,8) dy + \\
 & + \int_{15,84}^{17,4} (0,167y-32,5) dy + \int_{17,4}^{18,92} (0,282y-34,6) dy + \int_{18,92}^{20,39} (0,404y-36,9) dy + \int_{20,39}^{21,78} (0,537y-39,6) dy + \\
 & + \int_{21,78}^{23,08} (0,687y-42,8) dy + \int_{23,08}^{24,28} (0,862y-46,9) dy + \int_{24,28}^{25,36} (1,072y-52) dy + \int_{25,36}^{26,28} (1,252y-56,5) dy + \\
 & + \int_{26,28}^{27,14} (1,367y-59,6) dy + \int_{27,14}^{27,95} (1,5y-63,2) dy + \int_{27,95}^{28,71} (1,65y-67,4) dy + \int_{28,71}^{29,55} (1,824y-72,4) dy + \\
 & + \int_{29,55}^{30,32} (2,027y-78,4) dy + \int_{30,32}^{31,03} (2,273y-85,8) dy + \int_{31,03}^{31,66} (2,569y-95) dy + \int_{31,66}^{32,07} (2,748y-100,7) dy + \\
 & + \int_{32,07}^{32,48} (2,746y-100,6) dy + \int_{32,48}^{33,25} (2,244y-84,3) dy + \int_{33,25}^{34,25} (1,598y-62,8) dy + \int_{34,25}^{35,47} (1,188y-48,8) dy + \\
 & + \int_{35,47}^{36,88} (0,896y-38,4) dy + \int_{36,88}^{38,45} (0,67y-30,1) dy + \int_{38,45}^{40,15} (0,484y-22,9) dy + \int_{40,15}^{41,95} (0,32y-16,4) dy + \\
 & + \left. \int_{41,95}^{43,82} (0,172y-10,1) dy + \int_{43,82}^{100} (0,1y-7) dy + \int_{100}^{134} (0,286y-25,6) dy + \int_{134}^{140} (y-121,3) dy \right] = -1,71
 \end{aligned} \tag{B.1}$$

$$\begin{aligned}
 a_n = \frac{2}{T} \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} \left(z_m(y) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy = \frac{2}{T} \cdot & \left[\int_0^{0,57} \left((-26,502y) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \right. \\
 & + \int_{0,57}^{2,25} \left((-2,89y-13,5) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{2,25}^{4,96} \left((-1,611y-16,3) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
 & + \int_{4,96}^{8,56} \left((-1,016y-19,3) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{8,56}^{11,24} \left((-0,561y-23,2) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
 & + \int_{11,24}^{14,26} \left((-0,171y-27,6) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{14,26}^{15,84} \left((0,056y-30,8) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy +
 \end{aligned} \tag{B.2}$$

$$\begin{aligned}
& + \int_{15,84}^{17,4} \left((0,167y-32,5) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{17,4}^{18,92} \left((0,282y-34,6) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{18,92}^{20,39} \left((0,404y-36,9) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{20,39}^{21,78} \left((0,537y-39,6) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{21,78}^{23,08} \left((0,687y-42,8) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{23,08}^{24,28} \left((0,862y-46,9) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{24,28}^{25,36} \left((1,072y-52) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{25,36}^{26,28} \left((1,252y-56,5) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{26,28}^{27,14} \left((1,367y-59,6) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{27,14}^{27,95} \left((1,5y-63,2) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{27,95}^{28,71} \left((1,65y-67,4) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{28,71}^{29,55} \left((1,824y-72,4) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{29,55}^{30,32} \left((2,027y-78,4) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{30,32}^{31,03} \left((2,273y-85,8) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{31,03}^{31,66} \left((2,569y-95) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{31,66}^{32,07} \left((2,748y-100,7) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{32,07}^{32,48} \left((2,746y-100,6) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{32,48}^{33,25} \left((2,244y-84,3) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{33,25}^{34,25} \left((1,598y-62,8) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{34,25}^{35,47} \left((1,188y-48,8) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{35,47}^{36,88} \left((0,896y-38,4) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{36,88}^{38,45} \left((0,67y-30,1) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{38,45}^{40,15} \left((0,484y-22,9) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{40,15}^{41,95} \left((0,32y-16,4) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{41,95}^{43,82} \left((0,172y-10,1) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{43,82}^{100} \left((0,1y-7) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{100}^{134} \left((0,286y-25,6) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{134}^{140} \left((y-121,3) \cdot \cos\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy \Big]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_n = & \frac{2}{T} \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} \left(z_m(y) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy = \frac{2}{T} \cdot \left[\int_0^{0,57} \left((-26,502y) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \right. \\
& + \int_{0,57}^{2,25} \left((-2,89y-13,5) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{2,25}^{4,96} \left((-1,611y-16,3) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{4,96}^{8,56} \left((-1,016y-19,3) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{8,56}^{11,24} \left((-0,561y-23,2) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{11,24}^{14,26} \left((-0,171y-27,6) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{14,26}^{15,84} \left((0,056y-30,8) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{15,84}^{17,4} \left((0,167y-32,5) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{17,4}^{18,92} \left((0,282y-34,6) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{18,92}^{20,39} \left((0,404y-36,9) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{20,39}^{21,78} \left((0,537y-39,6) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{21,78}^{23,08} \left((0,687y-42,8) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{23,08}^{24,28} \left((0,862y-46,9) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{24,28}^{25,36} \left((1,072y-52) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{25,36}^{26,28} \left((1,252y-56,5) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{26,28}^{27,14} \left((1,367y-59,6) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{27,14}^{27,95} \left((1,5y-63,2) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{27,95}^{28,71} \left((1,65y-67,4) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{28,71}^{29,55} \left((1,824y-72,4) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{29,55}^{30,32} \left((2,027y-78,4) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{30,32}^{31,03} \left((2,273y-85,8) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{31,03}^{31,66} \left((2,569y-95) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{31,66}^{32,07} \left((2,748y-100,7) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{32,07}^{32,48} \left((2,746y-100,6) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{32,48}^{33,25} \left((2,244y-84,3) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{33,25}^{34,25} \left((1,598y-62,8) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{34,25}^{35,47} \left((1,188y-48,8) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{35,47}^{36,88} \left((0,896y-38,4) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{36,88}^{38,45} \left((0,67y-30,1) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{38,45}^{40,15} \left((0,484y-22,9) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \int_{40,15}^{41,95} \left((0,32y-16,4) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy +
\end{aligned} \tag{B.3}$$

$$\begin{aligned}
& + \int_{41,95}^{43,82} \left((0,172y-10,1) \cdot \sin\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{43,82}^{100} \left((0,1y-7) \cdot \sin\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \\
& + \int_{100}^{134} \left((0,286y-25,6) \cdot \sin\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy + \int_{134}^{140} \left((y-121,3) \cdot \sin\left(\frac{\pi ny}{T}\right) \right) dy \Big]
\end{aligned}$$

Уравнение профиля колеса.

$$\begin{aligned}
z(y) = & -0,86-9,08 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{140}\right) -1,44 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{70}\right) -3,33 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{46,67}\right) + 0,29 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{35}\right) - \\
& -0,12 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{28}\right) + 1,56 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{23,33}\right) + 0,8 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{20}\right) + 1,45 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{17,5}\right) + 0,31 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{15,56}\right) + \\
& + 0,58 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{14}\right) -0,12 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{12,73}\right) + 0,13 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{11,67}\right) -0,06 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{10,77}\right) + 0,23 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{10}\right) + \\
& + 0,18 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{9,33}\right) + 0,33 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{8,75}\right) + 0,26 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{8,24}\right) + 0,23 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{7,78}\right) + 0,14 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{7,37}\right) + \\
& + 0,11 \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{7}\right) -0,6 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{140}\right) -6,06 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{70}\right) -1,99 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{46,67}\right) -5,59 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{35}\right) - \\
& -1,68 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{28}\right) -3,55 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{23,33}\right) -0,32 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{20}\right) -1,77 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{17,5}\right) + 0,64 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{15,56}\right) - \\
& -1,22 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{14}\right) + 0,57 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{12,73}\right) -1,29 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{11,67}\right) + 0,18 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{10,77}\right) -1,28 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{10}\right) + \\
& + 0,13 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{9,33}\right) -1,03 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{8,75}\right) + 0,27 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{8,24}\right) -0,74 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{7,78}\right) + 0,29 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{7,37}\right) - \\
& -0,63 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{7}\right) = \tag{B.4} \\
= & -9,1 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{140} + 1,5\right) -6,22 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{70} + 0,23\right) -3,88 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{46,67} + 1,03\right) -5,6 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{35} -0,05\right) - \\
& -1,69 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{28} + 0,07\right) -3,88 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{23,33} -0,41\right) -0,87 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{20} -1,19\right) -2,29 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{17,5} -0,69\right) + \\
& + 0,71 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{15,56} + 0,46\right) -1,35 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{14} -0,45\right) + 0,58 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{12,73} -0,21\right) -1,3 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{11,67} -0,1\right) + \\
& + 0,19 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{10,77} -0,34\right) -1,31 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{10} -0,18\right) + 0,22 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{9,33} + 0,94\right) -1,08 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{8,75} -0,31\right) + \\
& + 0,37 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{8,24} + 0,78\right) -0,77 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{7,78} -0,3\right) + 0,32 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{7,37} + 0,46\right) -0,64 \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{7} -0,17\right)
\end{aligned}$$

Приложение Г
(обязательное)
Патенты РФ и авторские свидетельства

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 156444

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ БУКСОВАНИЯ
ЛОКОМОТИВА**

Патентообладатель(ли): **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"Брянский государственный технический университет" (RU)**

Автор(ы): *см. на обороте*

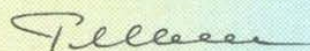
Заявка № 2015109505

Приоритет полезной модели 18 марта 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 13 октября 2015 г.

Срок действия патента истекает 18 марта 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 163519

УСТРОЙСТВО ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ
ВЕДУЩИХ КОЛЕС ЛОКОМОТИВА С РЕЛЬСАМИ

Патентообладатель(ли): **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"Брянский государственный технический университет" (RU)**

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015125762

Приоритет полезной модели 29 июня 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 04 июля 2016 г.

Срок действия патента истекает 29 июня 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 167614

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ БУКСОВАНИЯ
ЛОКОМОТИВА

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "Брянский государственный
технический университет" (RU)**

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2016117353

Приоритет полезной модели 04 мая 2016 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 10 января 2017 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 04 мая 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 167616

Устройство для предотвращения буксования локомотива

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"Брянский государственный технический университет"**
(RU)

Авторы: **Воробьев Владимир Иванович (RU), Новиков Виктор
Григорьевич (RU), Корчагин Вадим Олегович (RU), Новиков
Антон Сергеевич (RU), Измеров Олег Васильевич (RU),
Воробьев Дмитрий Владимирович (RU)**

Заявка № 2016112630

Приоритет полезной модели 04 апреля 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 10 января 2017 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 04 апреля 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 171080

Устройство для предотвращения буксования локомотива

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"Брянский государственный технический университет"
(RU)**

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2016112634

Приоритет полезной модели 04 апреля 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 19 мая 2017 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 04 апреля 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 171138

Устройство для увеличения давления колес транспортного средства на рельсы

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "Брянский государственный технический университет" (RU)**

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2016124242

Приоритет полезной модели 17 июня 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 22 мая 2017 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 17 июня 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 172435

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ БУКСОВАНИЯ
ЛОКОМОТИВА

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "Брянский государственный
технический университет" (RU)**

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2016117355

Приоритет полезной модели 04 мая 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 07 июля 2017 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 04 мая 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 172579

Устройство для предотвращения буксования локомотива

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "Брянский государственный
технический университет" (RU)**

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2016136742

Приоритет полезной модели 13 сентября 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 13 июля 2017 г.Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 13 сентября 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 172641

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ БУКСОВАНИЯ
ЛОКОМОТИВА

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "Брянский государственный
технический университет" (RU)**

Авторы: **Антипин Дмитрий Яковлевич (RU), Воробьев
Владимир Иванович (RU), Измеров Олег Васильевич (RU),
Бондаренко Денис Андреевич (RU), Корчагин Вадим Олегович
(RU), Маслов Максим Александрович (RU), Пугачев Александр
Анатольевич (RU), Редя Никита Александрович (RU)**

Заявка № 2016117354

Приоритет полезной модели 04 мая 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 18 июля 2017 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 04 мая 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 173552

Устройство для предотвращения буксования локомотива

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "Брянский государственный технический университет" (RU)**

Авторы: **Воробьев Владимир Иванович (RU), Новиков Виктор Григорьевич (RU), Корчагин Вадим Олегович (RU), Новиков Антон Сергеевич (RU), Измеров Олег Васильевич (RU), Воробьев Дмитрий Владимирович (RU)**

Заявка № 2016120627

Приоритет полезной модели 25 мая 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 30 августа 2017 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 25 мая 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016617934

«Программа моделирования поперечного положения
колёсной пары в колее»

Правообладатель: *Корчагин Вадим Олегович (RU)*Автор: *Корчагин Вадим Олегович (RU)*

Заявка № 2016615131

Дата поступления 20 мая 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 18 июля 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев