

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

На правах рукописи



Шалупина Павел Игоревич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
БЕСКОНТАКТНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ
КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ ГРУЗОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Павлюков Александр Эдуардович

Екатеринбург 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Современное состояние и тенденции развития бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава. Методы исследования тепловых процессов при колодочном торможении.....	9
1.1 Краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований нагрева колёс при колодочном торможении.....	10
1.2 Анализ отечественных и зарубежных технических решений систем бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов и направления их совершенствования.....	18
1.3 Общие сведения о методах исследования тепловых процессов при взаимодействии колеса и тормозной колодки.....	30
1.4 Постановка задач исследования.....	40
2 Разработка комплексной диагностической модели бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов на основе имитационного моделирования.....	43
2.1 Общие сведения о конструкции, применяемых материалах для изготовления колёс и тормозных колодок различных типов, особенностях их взаимодействия.....	43
2.2 Компьютерная модель нагрева колеса при колодочном торможении	48
2.3 Компьютерная модель определения траектории сканирования при тепловом контроле колодочных тормозов и вычисления уровня сигнала, получаемого приемником ИК-излучения.....	69
2.4 Выводы по главе 2.....	78
3 Теоретические и экспериментальные исследования процесса теплового контроля колодочных тормозов с использованием разработанной диагностической модели.....	79

3.1	Компьютерное моделирование нагрева колеса при колодочном торможении.....	80
3.2	Компьютерное моделирование определения траектории сканирования и вычисления уровня сигнала ик-излучения при тепловом контроле колодочных тормозов	112
3.3	Мониторинг нагрева колёс в эксплуатационных условиях, натурные испытания экспериментальной системы теплового контроля колодочных тормозов и статистический анализ полученных данных	121
3.4	Оценка адекватности комплексной диагностической модели теплового контроля колодочных тормозов.....	130
3.5	Выводы по главе 3.....	138
4	Разработка диагностического обеспечения бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов.....	140
4.1	Обобщенный анализ диагностических признаков и параметров зарубежных систем теплового контроля колодочных тормозов и требований, предъявляемых к ним.....	140
4.2	Выбор наиболее информативной зоны на колесе для теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава.....	151
4.3	Выбор системы диагностических признаков, пороговых значений и разработка алгоритмов теплового контроля колодочных тормозов.....	158
4.4	Выводы по главе 4.....	168
	Заключение	170
	Список литературы	174
	Приложение А. Паттерны нагрева колеса при различной длительности торможения	186
	Приложение Б. Материалы внедрения результатов работы.....	189

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Стратегией развития железнодорожного транспорта до 2030 года [75] в качестве одного из ключевых моментов социально-экономического роста страны выделена необходимость повышения безопасности функционирования железнодорожного транспорта. Одним из важнейших условий её обеспечения является надежная работа ходовых частей подвижного состава железных дорог и, в частности, их тормозных систем. Особую актуальность этому вопросу придаёт направленность железнодорожной отрасли на увеличение нагрузок на ось грузовых вагонов до 27-30 тс, повышение их максимальных скоростей движения до 140 км/ч, а также увеличение ресурса ободьев колёс грузовых вагонов до 600 тыс. км. Реализация этих требований невозможна без развития и комплексного использования средств диагностики подвижного состава на ходу поезда.

Согласно Концепции развития средств диагностики подвижного состава [40] одним из перспективных направлений развития является разработка системы выявления грузовых вагонов с неэффективно работающими автотормозами. Внедрение подобной системы позволит выявлять возникающие в процессе эксплуатации неисправности тормозных систем (неотпущенные тормоза, неправильная регулировка тормозной рычажной передачи, недействующие тормоза, неисправности воздухораспределителей) и своевременно их устранять, предупреждая возникновение аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте и снижая эксплуатационные издержки. Эту задачу целесообразно решать, опираясь на имеющийся в отрасли опыт реализации систем бесконтактного теплового контроля технического состояния ответственных узлов подвижного состава на ходу поезда, широко применяющихся как в России, так и за рубежом. Таким образом, задача совершенствования диагностического обеспечения бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов грузового подвижного состава является актуальной.

Объект исследования. Колодочные тормоза подвижного состава.

Область исследования. Тепловая диагностика ходовых частей подвижного состава, в частности, колодочных тормозов.

Степень разработанности темы. Исследования в области оценки работоспособности колодочных тормозов неразрывно связаны с вопросами нагрева колёс при реализации различных режимов торможения. Значительный вклад в исследование этих вопросов внесли ученые: И.А. Жаров [19-28], С.М. Захаров [29, 30], С.Н. Киселев [35-39], А.В. Саврухин [67-70], Р.А. Ефимов [14-18], В.К. Першин [60], А.М. Орлова [76], Е.А. Рудакова, А.В. Саидова, И.В. Турутин, В.В. Муравьев, Н.В. Мокин, Б.В. Харитонов, С.П. Васильев, Е.Ю. Лебедев, С.И. Кабанов, М.Х. Ахметзянов [3], С.П. Васильев, О.Е. Ключко, Г.А. Неклюдова [53-54], М.И. Глушко [8-9] и многие другие. Среди зарубежных исследователей нагрева элементов тормозных систем можно выделить М. Милошевича [107], К. Митуру [106], Р. Файа, В. Гупту, М. Ситарца [112-113], Х. Тошио [109] и других. Исследованиями и разработками в области комплексного контроля технического состояния подвижного состава и тепловой диагностики их ходовых частей занимались: В.М. Алексенко, А.А. Миронов [45-47], А.Г. Алексеев [1], В.А. Берзин, Э.Г. Миронов, В.Л. Образцов [55], М.В. Орлов, С.Н. Лозинский, В.И. Самодуров, Е.Н. Розенберг, М.М. Соколов, А.В. Третьяков, М.В. Анпилов, Е.Е. Трестман, Г.К. Сендеров, П.С. Шайдуров. Эти же вопросы рассматриваются в исследованиях зарубежных ученых: Э. Эйзенбранда [97], К. Галлахера [100-101], Г. Сибли [111] и других.

Цель и задачи. Цель настоящего диссертационного исследования заключается в совершенствовании диагностического обеспечения бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов на основе применения методов имитационного моделирования.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработать комплексную диагностическую модель бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава, позволяющую оценивать форму и уровень сигнала, получаемого приемником инфракрасного излучения при различных режимах торможения подвижного состава и вариантах ориентации инфракрасной оптики на объект контроля.

2. Выполнить исследования на разработанной модели для оценки влияния на степень и характер нагрева колёс, форму получаемого системой теплового контроля колодочных тормозов сигнала, различных факторов.

3. Подтвердить корректность разработанной модели на основе экспериментальных данных по мониторингу нагрева колёс в реальных условиях эксплуатации.

4. Разработать диагностическое обеспечение бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов в части алгоритмов, диагностических признаков, пороговых значений работоспособности и выбора наиболее рациональной зоны контроля на колесе.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработана комплексная диагностическая модель бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава, позволяющая оценивать форму и уровень сигнала, получаемого приемником инфракрасного излучения при различных режимах торможения подвижного состава и вариантах ориентации инфракрасной оптики на объект контроля.

2. Разработаны полноразмерные конечно-элементные модели цельнокатаного колеса грузового вагона и различных типов тормозных колодок для исследования нагрева колеса в различных режимах торможения и оценки информативности различных зон для осуществления теплового контроля на колесе.

3. Разработана методика экспериментальных натурных испытаний для исследования температур колёс в реальных условиях эксплуатации.

4. Разработаны система диагностических признаков и алгоритмы теплового контроля работоспособности колодочных тормозов, обоснованы рациональные пороговые значения теплового контроля для применения в разработанных алгоритмах.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана компьютерная реализация диагностической модели бесконтактного теплового контроля работоспособности колодочных тормозов подвижного состава.

2. Теоретическими и экспериментальными исследованиями обоснована рациональная зона на цельнокатаном колесе грузового вагона для осуществления бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов.

3. Для исследования теплового состояния цельнокатаного колеса грузового вагона при различных режимах торможения проведены натурные испытания по мониторингу нагрева колёс в реальных условиях эксплуатации.

4. Разработано диагностическое обеспечение бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов.

Методология и методы исследования. Общая методика исследований построена на применении метода конечных элементов при анализе процессов теплопереноса, методах аналитической механики, виртуального трехмерного моделирования, аналитической геометрии, теплотехнических измерений, испытаний в реальных условиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплексная диагностическая модель бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава на основе разработанных математических моделей нагрева цельнокатаного колеса грузового вагона при различных режимах торможения и осуществления теплового контроля при различных вариантах ориентации приемника инфракрасного излучения.

2. Результаты исследований процесса теплового контроля колодочных тормозов с использованием разработанной комплексной имитационной модели.

3. Результаты исследований нагрева колёс в эксплуатационных условиях и натурных испытаний экспериментальной системы теплового контроля работоспособности колодочных тормозов.

4. Результаты оценки корректности разработанной комплексной имитационной модели бесконтактного теплового контроля работоспособности колодочных тормозов на основе мониторинга нагрева колёс в реальных условиях эксплуатации.

5. Результаты исследований по оценке информативности различных зон на колесе при осуществлении теплового контроля работоспособности колодочных тормозов.

6. Система диагностических признаков, алгоритмы и пороговые значения теплового контроля работоспособности колодочных тормозов.

Степень достоверности результатов диссертационного исследования подтверждается соответствием результатов численного моделирования данным, полученным в экспериментальных исследованиях, исследованиях других авторов.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационного исследования докладывались на конференциях: IX Международной научно-практической конферен-

ции «Интеграция образовательной, научной и воспитательной деятельности в организациях общего и профессионального образования» (Екатеринбург, 2017), Всероссийской научной конференции аспирантов «Техника и технологии наземного транспорта» (Екатеринбург, 2018), Всероссийской научно-технической конференции «Наука и образование транспорту» (Екатеринбург, 2018), III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (Омск, 2018), X Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (Новосибирск, 2018, 2020), Региональной научно-технической конференции «Транспорт Урала» (Екатеринбург, 2018-2020), Международной конференции «Scientific Research of the SCO countries: Synergy and Integration» (Китай, г. Пекин, 2019), VIII Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития вагоностроения (Брянск, 2019). Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры «Вагоны» федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (Екатеринбург, 2016-2020 гг.).

Публикации. Основные положения диссертационной работы и научные результаты опубликованы в 9 печатных работах, в том числе 4 статьи опубликованы в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций», и 1 статья в издании, цитируемом базами данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, состоящего из 122 наименований, и приложения. Текст диссертации содержит 191 страницу, включает 47 рисунков и 19 таблиц.

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю, доктору технических наук, доценту А. Э. Павлюкову за помощь, терпение и поддержку в работе, а также благодарит сотрудников ООО «Инфотэкс АТ» в лице генерального директора, доктора технических наук А. А. Миронова и главного специалиста, кандидата технических наук Д. Н. Салтыкова за содействие в организации и проведении экспериментальных исследований по мониторингу нагрева колёс в реальных условиях эксплуатации.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ БЕСКОНТАКТНОГО ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ КОЛОДОЧНОМ ТОРМОЖЕНИИ

Увеличение осевых нагрузок и скоростей движения грузовых поездов ведет к увеличению тепловой нагрузки на элементы тормозной системы, что обуславливает необходимость проработки вопросов взаимодействия в системе «колесо – тормозная колодка». В реальных условиях эксплуатации в данной системе происходит сложное взаимодействие, вызванное комплексом статических, динамических и тепловых нагрузок. В связи с этим для изучения данного вопроса необходимо применять комплексный подход, состоящий:

- а) в применении современных компьютерных технологий имитационного моделирования, которые позволяют с высокой степенью точности описать реальные физические процессы, с одной стороны, и
- б) в проведении соответствующих экспериментальных исследований для подтверждения корректности результатов имитационного моделирования, с другой.

Таким образом, при проектировании систем теплового контроля (СТК) целесообразно проводить оценку степени и характера нагрева колес в различных эксплуатационных режимах с учетом возможно большего количества факторов и уменьшения количества принимаемых допущений методами математического имитационного моделирования. В настоящей главе предлагается краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований нагрева колёс при колодочном торможении, проводившихся как отечественными, так и зарубежными учеными; рассмотрены существующие технические решения СТК колодочных тормозов, аналитические и численные методы исследования тепловых процессов, имеющих место при взаимодействии колеса и тормозной колодки.

1.1 Краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований нагрева колёс при колодочном торможении

Теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов взаимодействия в системе «рельс – колесо – тормозная колодка» не только с точки зрения тепловых процессов, но и с точки зрения совокупного термомеханического нагружения элементов системы, посвящены работы [5; 35; 41; 52; 68; 84]. Авторами этих работ проведены исследования по оценке напряженно-деформированного состояния цельнокатаных колес при различных режимах торможения с различными величинами износа обода колеса, а также формами диска. Помимо полученного распределения напряжений в конструкциях цельнокатаных колес по их сечению в данных работах проведены расчеты тепловложений в колесо при различных видах торможения и оценено распределение температур по сечению колеса.

Взаимодействию композиционных тормозных колодок и цельнокатаных колёс посвящены работы ученых Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета [86; 87]. Отмечается, что колодки из полимерных композитов отличают стабильный коэффициент трения на всем диапазоне скоростей, высокий ресурс работы (до 160 тыс. км.). Однако из-за их низкой теплопроводности возрастает повреждаемость колес – за счет склонности композиционных колодок к наволакиванию металла колеса на рабочую поверхность колодки. В дальнейшем это приводит к появлению и развитию дефектов поверхности катания колес термомеханического характера (выщербин, наваров и ползунов).

Работы исследователей из Омского государственного университета путей сообщения посвящены вопросам развития тепловых процессов при торможении грузовых вагонов во времени [13; 82]. Было выяснено, что вследствие низкой теплопроводности состава композита ТИИР-300 (барит – 47,5%, каучук – 20%, асбест – 15%, сажа – 15%, сера – 2,5%) в зоне контакта возникают высокие термические напряжения [6]. Проведена оценка количества теплоты, выделяющейся при экстренном и служебном режимах торможения грузового вагона – выяснено, что на одном колесе выделяется порядка 3,1 МДж энергии. Исследователи отмечают, что

наиболее интенсивный, но недостаточный отвод тепла происходит в зоне контакта между колесом и колодкой.

Вопросы термомеханических повреждений колес при различных режимах движения достаточно подробно освещены в работах ученых Ростовского государственного университета путей сообщения [65; 77; 89]. Разработана методика идентификации триботермодинамики фрикционного контакта, позволяющая по вариациям диссипативной составляющей трения трибосистемы диагностировать возможное образование термомеханических повреждений. В работе [89] отмечается, что измерить температуру в контакте трения инструментальными средствами (контактными и бесконтактными) не представляется возможным, т.к. формирование «температуры вспышки» происходит по фактической площади касания на вершинах микронеровностей. При размыкании контакта происходит мгновенная диссипация энергии и температуры в окружающую среду. Лишь незначительная часть энергии передается контактирующим телам через микронеровности и формирует объемную температуру, которую и могут зафиксировать термопары и инфракрасная техника.

Значительный вклад в развитие методологии оценки напряженно-деформированного состояния цельнокатанных колес и определения температур при взаимодействии элементов системы «рельс – колесо – тормозная колодка» внесли работы ученых Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта [19–30; 42; 43]. Проблемы контактного взаимодействия и оценкой тепловых нагрузок колес занимались И.А. Жаров, С.М. Захаров, С.Н. Киселев, А.Н. Неклюдов, А.В. Саврухин, Р.А. Ефимов. Под началом С.Н. Киселева в Московском государственном университете путей сообщения начала свою работу научная школа «Развитие методов решения задач нелинейной и нестационарной теплопроводности и термовязкоупругопластичности» [5; 14–17; 17–19; 34–39; 41; 51; 52; 68].

В работе И.А. Жарова [19] рассмотрены вопросы взаимодействия рельса, колеса и тормозной колодки. Показано, что температуры на пятне контакта между колесом и рельсом при юзе и на пятнах контакта колодки и колеса близки и могут

достигать 800...900 °С. При помощи аналитических методов проведена оценка допустимых нагрузок и сил трения в контакте между колесом и колодкой. Автор отмечает, что при исследовании тепловых процессов в колодочном торможении необходимо учитывать явление термоупругости. Однако учет данного явления при исследовании композиционных тормозных колодок целесообразен лишь при длительном торможении, либо при торможении с высоких скоростей.

В работах А.В. Саврухина и Р.А. Ефимова [14–18; 67; 69; 70] исследуются вопросы моделирования кинетики напряженно-деформированного состояния цельнокатанных колес при тепловых нагрузениях как в условиях эксплуатации, так и при термообработке колес. Проведенные учеными исследования показали, что наиболее высокие температуры в цельнокатанных колесах возникают при длительном торможении (1200 с) и постоянной скорости движения поезда. Температура обода колеса при этом находится в линейной зависимости от степени его изношенности.

В работе С.М. Захарова [30] отмечается важность исследований по определению распределения температур в колесе и колодке для предотвращения появления в них термических трещин, учета доли температуры поверхности колеса в температуре в зоне контакта колеса и рельса, а также для расчета коэффициента трения между колесом и колодкой. Утверждается, что изменением теплопроводности, теплоемкости и плотности материалов в зависимости от температуры можно пренебречь, а учет третьего тела (рельса) целесообразно вводить в расчеты при выборе материала колодки, исследовании механизмов изнашивания колодок.

П.С. Анисимов в работе [66] разработал методику оценки объемной температуры элементов в системе «колесо – тормозная колодка». Объемная избыточная температура обода колеса τ_0 согласно данной методике вычисляется по формуле:

$$\tau_0 = \frac{Q_0}{A\alpha F_0} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F_0 t_i}{G_0 c}} \right), \quad (1.1)$$

где Q_0 – количество теплоты, передаваемое в обод колеса при торможении;

A – механический эквивалент тепловой работы;

α – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду;

F_0 – площадь поверхности трения;

G_0 – вес обода колеса;

c – теплоемкость колеса;

t_i – интервал времени действительного торможения.

Исследованиям напряженно-деформированного состояния элементов конструкций вагонов и локомотивов, а также моделированием динамики механических систем занимаются ученые Брянского государственного технического университета. Решением контактных и тепловых задач занимаются такие ученые как В.И. Сакало, А.В. Сакало и др. [50; 71]. В работе [71] предложена методика учёта влияния температурных напряжений, возникающих в колёсах электровоза при колдочном торможении, на накопление контактно-усталостных повреждений в них. Данная методика реализована в программном комплексе «Универсальный механизм».

Исследованиями процессов теплообмена в дисковых тормозах подвижного состава занимаются Д.В. Титарев, Балакин В.А., Галай Э.И. и М.А. Моисеенко [48; 49; 78; 79]. В частности, в работе [48] представлены результаты численного моделирования теплового состояния деталей дискового тормоза скоростного вагона, полученные путём решения уравнения нестационарной теплопроводности в движущейся среде методом расщепления по физическим процессам. По результатам исследований доказано, что доминирующее влияние на характер распределения температур в деталях тормоза оказывает явление конвективного переноса тепла. Исследования показали, что максимальная температура в системе «накладка – тормозной диск» достигает максимального значения 491°C уже на 31 с после начала торможения. В работе [79] авторами выполнено компьютерное моделирование нестационарных температурных полей и напряжений, возникающих в алюминиевом тормозном диске при экстренном торможении. Авторами изучено влияние конструктивного исполнения диска, его толщины, физико-механических характеристик материала, характера распределения давлений во фрикционном контакте на его теплонапряженность. В работе [4] проведены исследования по качественной

оценке температурного распределения и решена тепловая задача о фрикционном нагреве тел трения в дисковых тормозах подвижного состава. Получены аналитические зависимости для определения коэффициента распределения тепловых потоков между тормозной накладкой и диском и приращений температур в них за период торможения.

Исследованиями в области тормозных средств подвижного состава в целом, а также тепловых режимов при фрикционном взаимодействии колеса и тормозной колодки, в частности, занимались ученые Уральского государственного университета путей сообщения [8; 9; 60]. Так в работе [60] получены аналитические выражения для определения максимальной температуры поверхности трения при постоянном:

$$T(0, t) = 2 \frac{q_0}{\lambda} \sqrt{\frac{at}{\pi}}, t \leq t_b, \quad (1.2)$$

$$T(0, t) = 2 \frac{q_0}{\lambda} \left(\sqrt{\frac{at}{\pi}} - \sqrt{\frac{a(t-t_b)}{\pi}} \right), t \leq t_b, \quad (1.3)$$

и линейно уменьшающемся тепловом потоке непрерывного теплового режима:

$$T_2(0, t) = 2 \frac{q_0}{\lambda} \sqrt{\frac{at}{\pi}} \left(1 - \frac{2t}{3t_k} \right), t \leq t_b, \quad (1.4)$$

$$T(0, t) = \left[2 \frac{q_0}{\lambda} \left(\sqrt{\frac{at}{\pi}} - \sqrt{\frac{a(t-t_b)}{\pi}} \right) \left(1 - \frac{2t}{3t_k} \right) + \frac{2t}{3t_k} \sqrt{\frac{a(t-t_b)}{\pi}} \right], t \leq t_b, \quad (1.5)$$

где $T(0, t)$ – превышение температуры над начальной (координата 0 соответствует поверхности трения колеса о колодку);

t – время, отсчитываемое от начала торможения;

q_0 – плотность теплового потока в начальный момент времени;

λ – теплопроводность;

a – температуропроводность;

t_b – момент времени, для которого определяется максимальная температура;

t_k – полное время торможения.

Развитие методов компьютерного моделирования и возросшая мощность вычислительной техники неизбежно привели к широкому применению метода конечных элементов (МКЭ) для решения задач по моделированию температурных нагрузений в системе «рельс – колесо – тормозная колодка» [14; 18; 50; 71].

Задачи по оценке взаимного влияния температур, деформаций и напряжений при торможении при помощи МКЭ в плоской и объемной постановке решались исследователями из Австралии [99]. Кинетика температурных полей в цельнокатанных вагонных колесах рассматривается в работах [3; 4; 53; 54; 83; 99], причем температурные распределения получены путем моделирования с использованием метода конечных элементов в осесимметричной постановке.

Вопросами исследования тепловых процессов во фрикционном контакте между колесом и колодкой занимались многие зарубежные ученые. Среди них стоит отметить исследования М. Милошевича [107]. Исследуя тепловые процессы при колодочном торможении тягового подвижного состава при помощи методов имитационного моделирования, ученые оценили распределение температур в колесе при различных значениях удельной силы нажатия на тормозную колодку и скоростях движения локомотива. При этом рассматривалось цельнокатаное колесо с криволинейным диском и четыремя чугунными тормозными колодками. Максимальная температура при скорости движения 60 км/ч в груженом режиме составила 772°C.

К. Митура и Р. Файа в работе [106] провели расчеты температурных полей в колесах пассажирских вагонов при торможении со скорости 200 км/ч с учетом зависимостей коэффициента сцепления и коэффициента трения от скорости движения для чугунных тормозных колодок. Выполненные для бандажных колес диаметром 950 мм расчеты показали, что при торможении в течение 30 минут обод колеса нагревается до температуры около 300°C.

Экспериментальные стендовые исследования по изучению нагрева бандажей вагонных колес проводились и японскими учеными [109]. На специальном стенде исследовался рост и распределение температур и напряжений на различной глу-

бине от поверхности катания колеса при торможении композиционными тормозными колодками. Исследования показали, что наибольшая температура колеса на глубине 10 мм от поверхности катания составила 630°C .

Ученые из Берлинского института железнодорожного транспорта проводили исследования, связанные с измерением температуры колеса при торможении [114]. На основании экспериментальных исследований получены зависимости температуры различных точек обода колеса от длины тормозного пути, реализуемой тормозной силы, радиуса колеса и других параметров. Данные исследования показали, что разность температур между центром и ободом колеса может составлять до 300°C , что неминуемо приводит к появлению пластических деформаций колеса.

Комплексный подход к исследованию нагруженности колесных пар применяли польские ученые [112; 113]. Они провели стендовые испытания с имитацией торможения колесной пары, а также численное моделирование нагружения колесных пар. При этом погрешность результатов моделирования и испытаний составила 5%. Во время стендовых испытаний максимальная температура обода колеса достигла порядка 650°C .

Результаты исследований по тепловому расчету инновационных тележек моделей 18-9889 и 18-9890 [76] с осевой нагрузкой 27 тс со скорости 100 км/ч и осевой нагрузкой 20 тс со скорости 140 км/ч показали, что максимальная температура обода колес составила 987°C и 849°C или 714°C и 576°C соответственно.

Группа исследователей из Сибирского государственного университета путей сообщения провела физическое и численное моделирование тепловых и деформационных полей в железнодорожном колесе при торможении [83]. Результаты численного моделирования отличаются от экспериментальных на 10...30% в разных точках колеса. Численное моделирование позволило качественно оценить тепловые и деформационные поля при колодочном торможении. Вместе с этим для получения достоверных данных о степени нагрева колеса авторы рекомендуют использовать натурные стенды с моделированием влияния максимального числа факторов, в том числе, и контакт колеса с рельсом.

В работе [3] отмечается, что максимальная температура при кратковременном торможении, достигаемая через 20-30 с после его начала, составляет порядка 260°C. При длительном торможении в течение 1200 с максимальные температуры в диапазоне 400...600°C возникают на ободу колеса в конце процесса торможения. Авторы отмечают, что при длительном торможении высокие значения интенсивности напряжений возникают в зонах сопряжения диска с ободом и ступицей, что приводит к появлению пластических деформаций. Дополнительно сообщается о необходимости расчета температурных полей в длительном режиме торможения с учетом коэффициента теплообмена 100 Вт/(м·°C).

Методика расчета температурного распределения с учетом напряжений в колёсах подвижного состава в стационарной постановке предложена в работе [54]. В работе приведены нелинейные зависимости коэффициентов теплопроводности и конвективной теплопередачи от температур и рассмотрены методы определения термического сопротивления контактного слоя с учетом давления и температуры в контакте. Объектами исследований для апробации предложенных методик выступали бандажные колёса с дисковым и спицевым центрами в условиях длительного торможения. Полученные результаты в виде полей распределения температур и напряжений сравнивались с экспериментальными данными.

Оценка влияния параметров торможения на температурное распределение в колёсах локомотивов проведена в работе [53]. Приведены результаты моделирования МКЭ нестационарных температурных полей в бандажных колёсах, в различных режимах торможения. Аналогичные исследования проведены в работе [115]. С целью оценки температурного распределения в колесе с заданными условиями качения и скольжения проведено термомеханическое моделирование нагрева колеса в длительных режимах ускорения и замедления движения поезда. Результаты исследований показали, что реальная картина температурного распределения в колесе неоднородна и имеет пиковые температурные вспышки, которые, как утверждается, могут привести к деформированию колеса и возникновению высоких напряжений.

Аннотируемые исследования дают возможность оценить тепловую нагрузку колеса при колодочном торможении в различных начальных и граничных условиях как в стационарном, так и в нестационарном режимах теплопереноса. Тем не менее, для дальнейшего совершенствования диагностического обеспечения СТК колодочных тормозов подвижного состава необходимо разработать математические модели взаимодействия колеса с тормозными колодками для исследования теплового состояния системы «колесо – тормозная колодка» при различных режимах торможения с учетом характеристик материала-наполнителя колодки, режима воздухораспределителя и других важных параметров. Разрабатываемые модели позволят определить основные технические параметры СТК колодочных тормозов.

1.2 Анализ отечественных и зарубежных технических решений систем бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов и направления их совершенствования

Развитие средств бесконтактного теплового контроля ходовых частей железнодорожного подвижного состава началось в 1950-х гг. в США, когда были разработаны и внедрены в эксплуатацию первые детекторы греющихся букс (ДГБ) с использованием приемников инфракрасного излучения. Последовавшее за этим повсеместное внедрение на железных дорогах всего мира систем обнаружения нагретых букс было обусловлено их высокой экономической эффективностью, поскольку, несмотря на относительно небольшие расстояния между пунктами технического обслуживания (ПТО) вагонов, фиксировалось сравнительно большое количество изломов шеек осей, приводивших к сходу вагонов с рельс и значительным разрушениям инфраструктуры [55].

Примерно в это же время (1958 год) началась разработка отечественных устройств обнаружения перегретых букс на ходу поезда. В 1962 году под руководством П. С. Шайдурова создан отечественный прибор обнаружения аварийно нагретых букс (ПОНАБ), который в последующие годы модернизировался под руководством В. И. Самодурова (ПОНАБ-2) и С. Н. Лозинского (ПОНАБ-3) в плане

конструкции и применяемой элементной базы [1; 74; 85]. В 1978-1982 гг. в Уральском отделении АО «ВНИИЖТ» реализована дистанционно-информационная система контроля подвижного состава типа ДИСК-БКВ-ЦО, состоящая из базовой подсистемы обнаружения перегретых букс ДИСК-Б и функционально связанных с ней подсистем контроля колёс ДИСК-К, выявления волочащихся деталей ДИСК-В, централизации и обработки данных ДИСК-ЦО. Уже в конце 1990-х гг., когда аппаратура ПОНАБ-3 и ДИСК морально и физически устарела, в компании ЗАО НПЦ «Инфотэкс» под руководством А. А. Миронова и Н. В. Степанова разработано и освоено производство двух модификаций комплекса технических средств мониторинга КТСМ-01 и КТСМ-01Д, использовавшихся также для модернизации устаревшей аппаратуры ПОНАБ-3 и ДИСК. Именно в конструкции КТСМ-01Д для теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава применялись вспомогательные напольные камеры, инфракрасная оптика которых ориентирована на ступицы колёс с наружной стороны (рисунок 1.1, а). В 2001 году принято решение о серийном производстве многофункционального комплекса технических средств типа КТСМ-02. В 2006 году началось его массовое внедрение и выполнение работ по модернизации приборов КТСМ-01 на КТСМ-02. В аппаратуре КТСМ-02 применяется программное обеспечение, позволяющее измерять температуру нагрева буксового узла в градусах Цельсия, с применением различных критериев тревожной сигнализации и вариантов настройки пороговых значений для контроля нагрева букс грузовых вагонов, реализацией алгоритмов распознавания различных конструкций буксовых узлов по тепловому сигналу. Однако отказ от вспомогательных напольных камер, применявшихся в КТСМ-01Д и ориентированных на ступицы колёс, в пользу основных напольных камер КНМ-05 с креплением на рельсе привел к невозможности непосредственной оценки нагрева колёс при колодочном торможении. Вследствие особенностей размещения и ориентации оптики (см. рисунок 1.1, б) их использование позволяет выявлять заторможенные тележки по тепловой аномалии боковых рам тележек и только в тех случаях, когда заторможенными являются чётные колёсные пары. Подобный метод теплового контроля заторможенных колёсных пар хотя и является в своем роде уникальным, однако создание на

его базе полноценной системы бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов не представляется возможным.

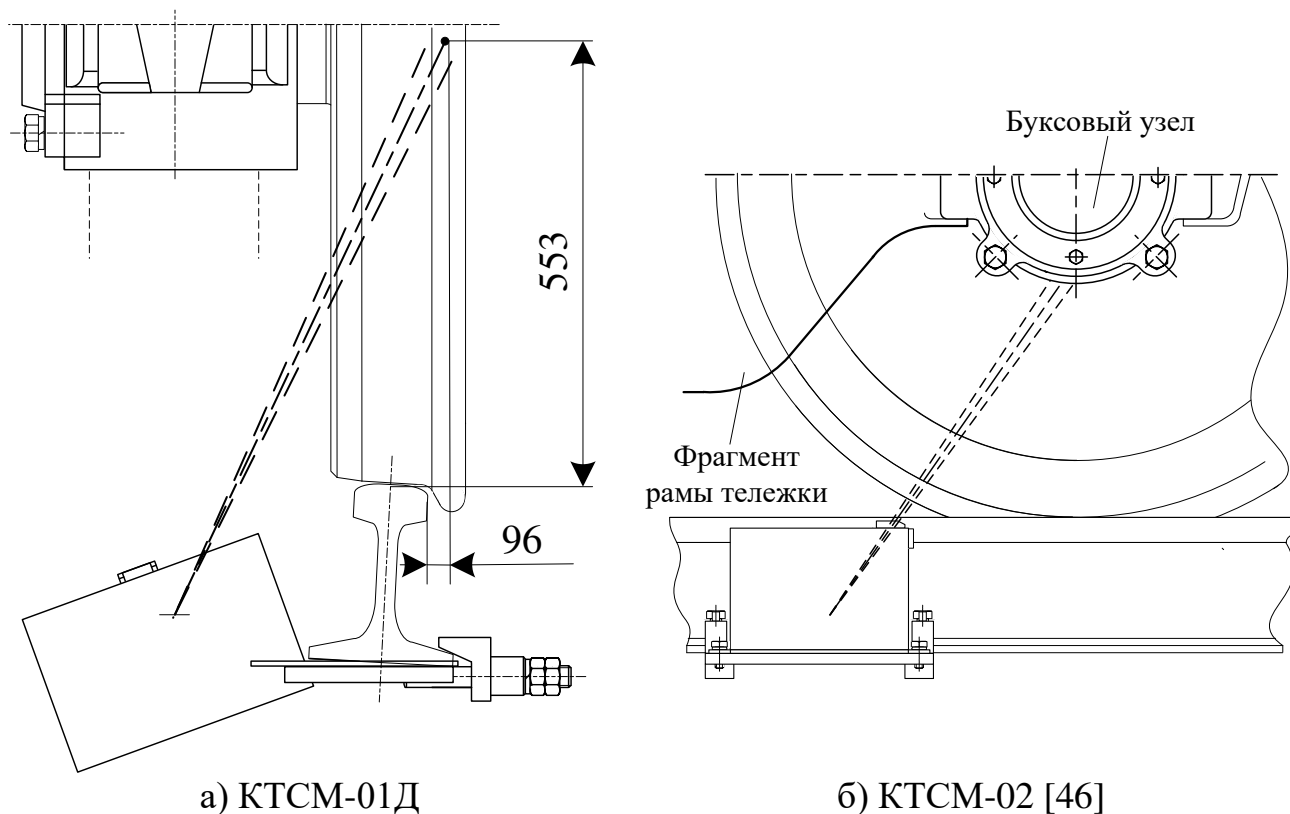


Рисунок 1.1 – Ориентация ИК-оптики в отечественных СТК

За рубежом СТК колодочных и дисковых тормозов подвижного состава в настоящее время применяются повсеместно в составе так называемых комплексных систем обнаружения «горячих» колёс и буксовых узлов (далее для удобства будем именовать их СТК). Рассмотрим более подробно этапы развития и применяемые решения в зарубежных СТК.

В 1966 году американским изобретателем Г. Сибли предложена конструкция детектора «горячих» колёс [111]. Согласно патенту, аппаратуру предлагается размещать внутри пути для осуществления теплового контроля гребней колёс. Поскольку расположение оборудования внутри пути связано с возможностью его повреждения волочащимся оборудованием, изобретатель предлагает два варианта установки инфракрасной оптики (см. рисунок 1.2).

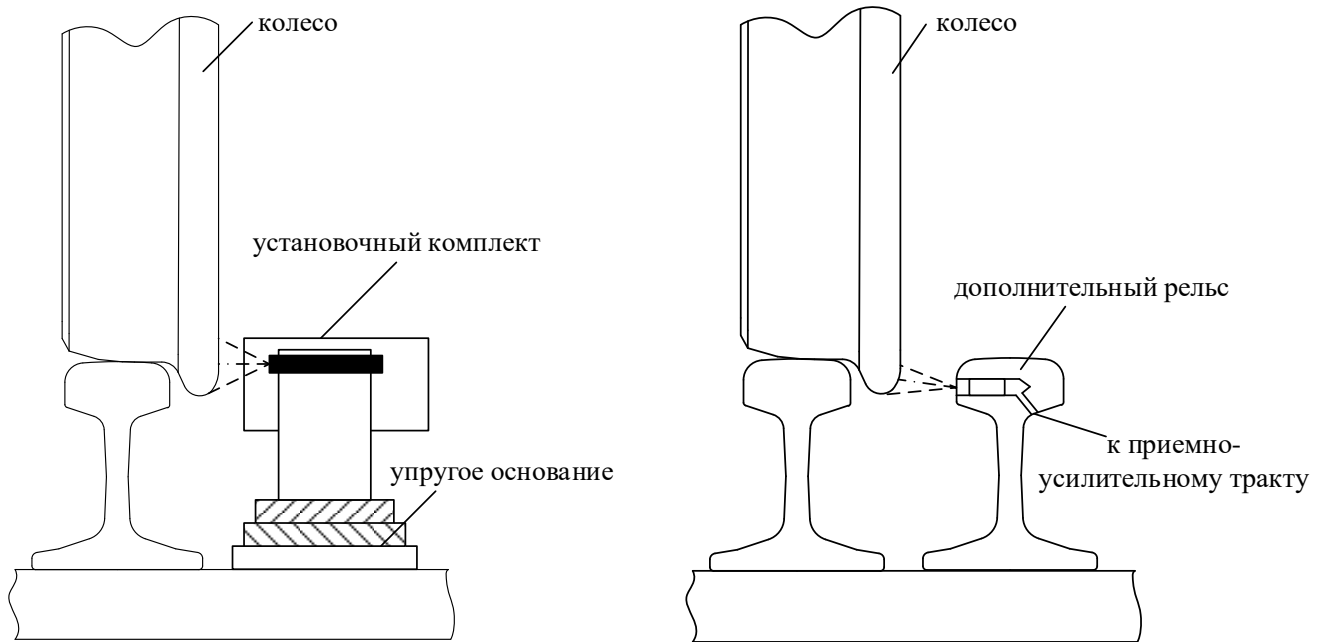
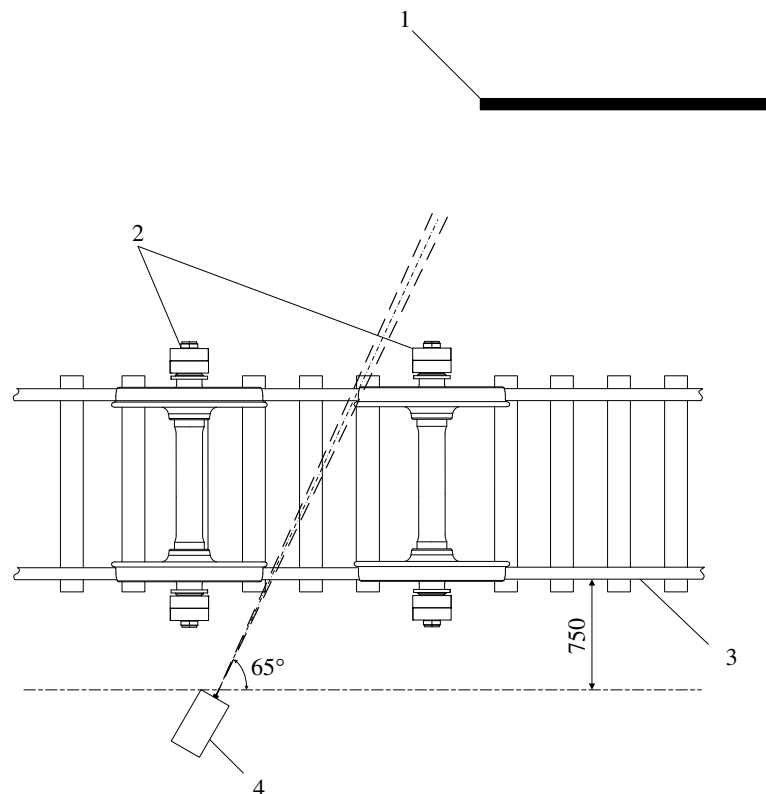


Рисунок 1.2 – Детектор «горячих» колёс [111]

Как видно из рисунка 1.2, предлагается размещать оптику в установочном комплекте на упругом основании. Инфракрасная оптика располагается в установочном комплекте таким образом, чтобы волочащиеся детали не смогли нанести ей повреждения, а применение упругого основания и его возможность деформироваться в заданных пределах под воздействием ударов со стороны волочащихся деталей позволяет обезопасить оптику. Вторым вариантом является размещение оптики в дополнительном рельсе, устанавливаемом рядом с основным. Для этого в дополнительном рельсе высверливаются проточки для установки оптики и укладки электрических цепей приемно-усилительного тракта.

В 1973 году известным изобретателем К. Галлахером запатентовано устройство обнаружения перегрева колёс и тормозных колодок [101]. Оно предназначено для обнаружения перегрева тормозных колодок любого типа и передачи номера вагона в составе. Основным элементом устройства является датчик, установленный на расстоянии примерно 75 см от рельса и представляющий собой теплочувствительный элемент с оптической системой для восприятия узкого пучка теплового излучения. Отмечается, что при выборе места для установки датчика и ориентации его на контролируемый объект необходимо учитывать разброс геометрических размеров колеса, высоту установки тормозной колодки, возможность попадания на

него теплового излучения буксового узла. Исходя из этих соображений и принимая во внимание ширину колеи 1435 мм и базу вагонных тележек 1676 и 1371 мм, изобретателем предложено ориентировать ось теплочувствительного датчика на уровне примерно 75 мм над уровнем головки рельса (УГР) под углом 65° к оси пути (рисунок 1.3). Необходимым элементом устройства является темный световой экран, обеспечивающий в отсутствие вагонов постоянный низкий уровень излучения, попадающего на датчик. Дополнительные блоки устройства обеспечивают усиление полученных сигналов, сравнение с предельно допустимым уровнем и выдачу на станции.



1 – темный экран, 2 – колесные пары одной тележки, 3 – путь, 4 – устройство

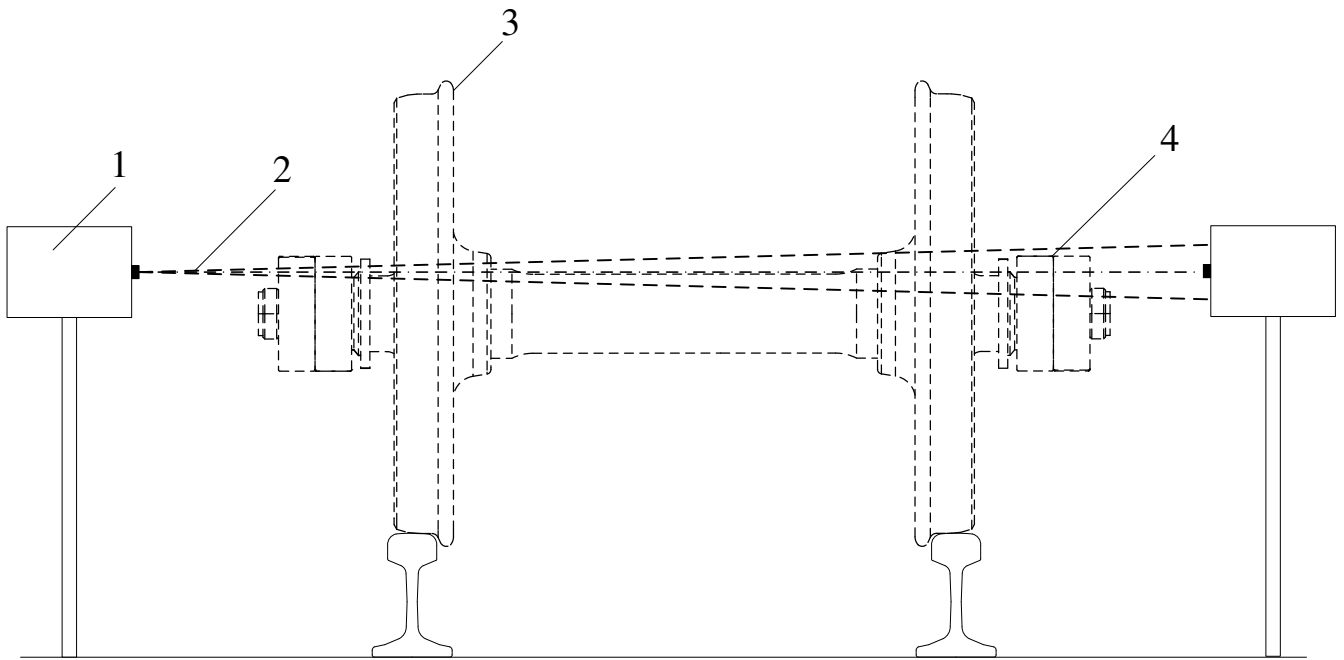
Рисунок 1.3 – Устройство обнаружения перегрева колёс и тормозов [101]

В работе [93] описан способ бесконтактного теплового контроля тормозов железнодорожного подвижного состава, с помощью которого можно измерить температуры подавляющего большинства типов тормозов (в т. ч. колодочных, осевых и колёсных дисковых тормозов). Способ характеризуется использованием измерительного устройства с инфракрасным датчиком, который сканирует колесо по-

движной единицы на высоте 1...5 см над поверхностью рельса. При этом ось датчика направлена под углом к горизонту $10^\circ \dots 22^\circ$ и $7^\circ \dots 18^\circ$ к оси пути. Измерительное устройство управляется посредством путевого переключателя, активирующим устройство, пока колесо проходит через зону теплового контроля. Предусмотрена возможность увеличения времени активности измерительного устройства на коэффициент N для целей осуществления теплового контроля осевого тормозного диска.

В работе [120] обнаружение перегретых буксовых узлов, колёс и их составных частей предлагается производить путем усиления электрического сигнала, получаемого от датчика инфракрасного излучения на основе пироэлектрической ячейки. Температуру окружающей среды предлагается определять посредством прерывания падающего излучения с помощью асинхронного затвора, время закрытия которого меньше периода сканирования датчика. Усиленный электрический сигнал преобразуется в цифровой и затем обрабатывается микроконтроллером и соответствующим аппаратным и программным обеспечением. Выходной сигнал (как цифровой, так и аналоговый) передается на постовое оборудование для дальнейшей обработки.

В работе [100] предложено устройство обнаружения перегрева колёс и буксовых узлов (см. рисунок 1.4).



1 – корпус для размещения инфракрасной оптики, 2 – ось приемника ИК-излучения, 3 – колесо, 4 – буксовый узел

Рисунок 1.4 – Устройство обнаружения перегрева колёс и буксовых узлов [100]

Предложенное устройство представляет собой совокупность двух опор, на которых закреплены установочные комплекты СТК. В каждом из них установлен инфракрасный датчик таким образом, что они имеют общую оптическую ось, расположенную в горизонтальной плоскости и параллельную рельсам. В отсутствие проходящего поезда датчики регистрируют температуру поверхности расположенного напротив корпуса для размещения оптики как температуру окружающей среды. Предложенная ориентация оптики позволяет получать данные о температуре всех колёс и буксовых узлов проходящего состава.

В работе [116] предложен алгоритм оценки температуры тормозного диска с тормозной накладкой, приведенной во фрикционный контакт с диском, через тормозной привод. Алгоритм имеет следующую последовательность:

- определение относительной угловой скорости между диском и накладкой;
- определение усилия, приложенного к диску при активации привода;

- вычисление тепловой энергии, которой обмениваются диск, окружающая среда и накладка;
- вычисление механической энергии, преобразованной в тепловую, при фрикционном контакте диска и накладки;
- вычисление полезной тепловой энергии, приложенной к диску, как разность между механической энергией, рассеиваемой в результате трения, и тепловой энергией, передаваемой через диск, накладку и окружающую среду;
- получение количественного показателя температуры тормозного диска по отношению к полезной тепловой энергии, его массе и теплоемкости.

В работе [122] предлагается способ индикации перегрева железнодорожного колеса, заключающийся во встраивании в колесо элемента с высокой теплопроводностью для непосредственного контроля теплового состояния внутри него. Такой теплочувствительный элемент при этом предлагается выполнять в виде болта с головкой, закрепляемого в ступице колеса. На головку наносится нестираемая термоиндикаторная метка, цвет которой однозначно показывает, в допустимых ли пределах находится температура колеса. Подобный способ предлагается использовать также для осуществления контроля состояния буксовых узлов и дисковых тормозов.

В работе [94] предлагается способ диагностики тормозного оборудования подвижного состава, который включает в себя прием сигналов, представляющих температуры колёс, и формирование измеренного профиля температуры колеса на основе сигналов. По меньшей мере, часть измеренного профиля представляет температуру колеса. Предложенный способ также включает в себя идентификацию атрибутов сигнатуры в профиле температуры измеренного колеса и его сравнение с эталоном.

В работе [121] показаны способ и устройство измерения температуры колёс и буксовых узлов, включающее в себя линейный массив из 96 чувствительных к ИК-излучению элементов, имеющий удлиненную вертикально ориентированную зону обзора. Зона обзора подобного приемника составляет порядка 76° , что обеспечивает зону контроля при вертикальной ориентации размером примерно 1200 мм

на расстоянии 1000 мм от объекта контроля. При осуществлении сканирования приемник многократно (с шагом по перемещению поезда примерно 25 мм) сканирует объект контроля, формируя последовательность сигналов, которые затем модифицируются в плоское растровое изображение, отображающее тепловую структуру объекта. Исходя из заявленного шага сканирования, можно сделать вывод о том, что при скорости поезда 100 км/ч частота сканирования должна составлять не менее 1000 кадров/с. Как отмечают изобретатели, такие приемники имеют значительный недостаток, заключающийся в необходимости термоэлектрического охлаждения чувствительной к инфракрасному излучению матрицы, что может привести к значительному удорожанию комплекта СТК.

В работе [91] предлагается устройство и способ определения температуры колёс и буксовых узлов на основе определения длины волны инфракрасного излучения. Предлагаемое устройство содержит датчик, считывающий ИК-излучение в диапазонах двух или более длин волн и генерирующий сигналы измеренного ИК-излучения в каждом из диапазонов длин волн. Центральный процессор определяет либо температурный диапазон колёс и букс, либо непосредственно их температуры.

В последние годы за рубежом ведутся работы по созданию систем комплексного анализа подвижного состава на основе инфракрасных образов контролируемых подвижных единиц. К примеру, в работе [104] предлагается вариант системы анализа железнодорожного подвижного состава на основе получения многомерного инфракрасного представления транспортного средства. Отдельные компоненты вагонов и локомотивов идентифицируются по их инфракрасным представлениям, а получаемая информация позволяет судить об их техническом состоянии. Полный анализ технического состояния на основе инфракрасного представления вагона или локомотива возможен не только при движении, но и на сортировочных станциях. Предлагаемая в [104] система включает в себя подсистему сбора данных, устанавливаемую на опору в непосредственной близости от железнодорожных путей. Подсистема сбора данных может включать несколько измерительных прибо-

ров (например, для каждого из путей, если система расположена между двумя путями). Опорная конструкция обеспечивает регулировку высот и углов ориентации каждого используемого прибора. Как отмечают авторы, вероятность снижения эффективности процесса контроля вследствие плохих погодных условий и загрязнений снижается за счет возможности применения большего количества измерительной аппаратуры.

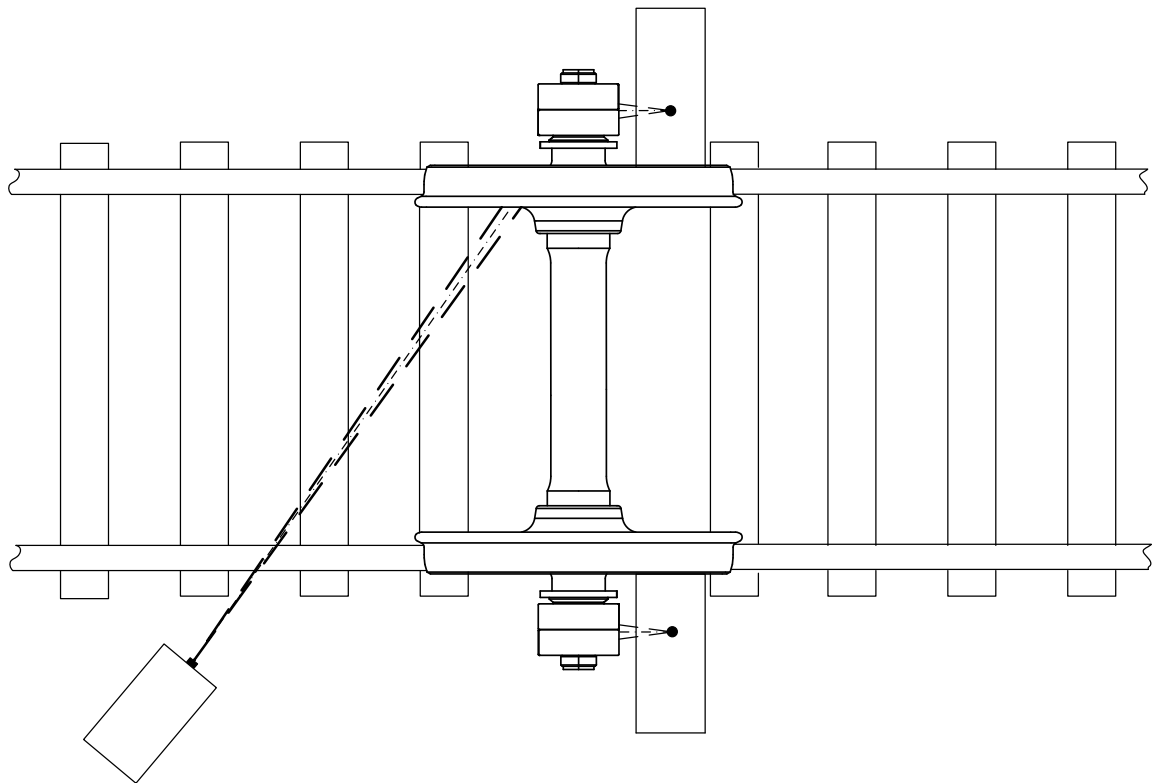
В работе [90] для измерения температур колёс на ходу поезда предлагается использовать съемные средства теплового контроля, устанавливаемые на тележку вагона посредством мощных электромагнитов и использующие в качестве источника питания литиевые аккумуляторные батареи со сроком работы от одного заряда не менее 2-х лет.

В работе [118] предлагается система оценки состояния ходовой части железнодорожного подвижного состава на основе многоэлементного приемника электромагнитного излучения в ИК-диапазоне, содержащего массив чувствительных элементов. Каждый из элементов массива может иметь различные зоны контроля на контролируемом объекте ходовой части. Система также хранит характеристические данные форм сигналов, соответствующих известным сигнатурам различных объектов контроля (эталон). Для обработки получаемых данных, идентификации типа сканируемого узла, сравнения их с эталонами и принятия решения о состоянии работоспособности контролируемого узла используется микропроцессорная система.

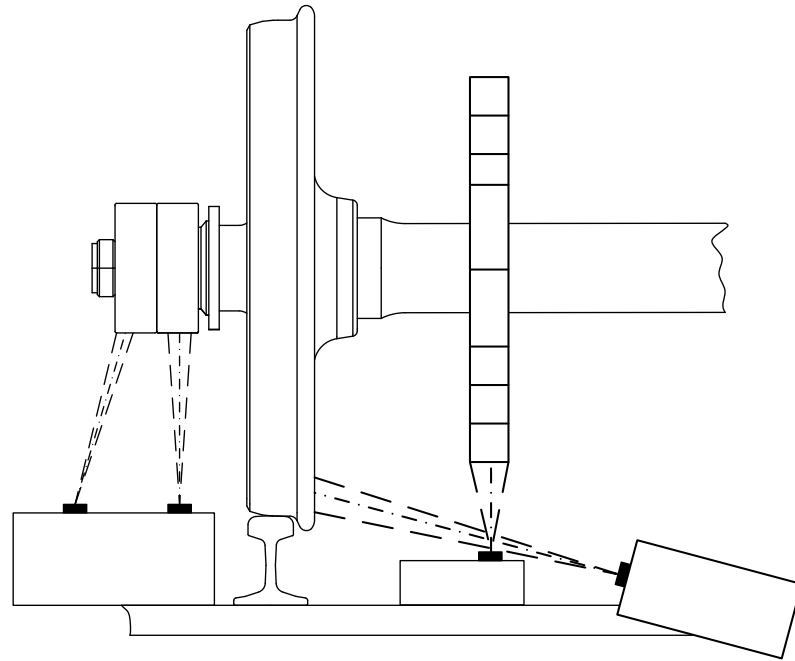
В работах китайских изобретателей предлагается устройство для обнаружения неисправностей в перегретых колёсах железнодорожного подвижного состава. Датчики температур левого и правого колёс, а также их корпуса симметрично закрепляются по обеим сторонам пути. Как отмечают авторы, устройство может быть использовано для модификации существующих СТК. Температура обода колеса при работе может быть точно и быстро измерена без влияния внешних факторов (солнечного излучения и др. факторов). Как утверждается, устройство может ис-

пользоваться для точного прогнозирования неисправностей колёс, повышения степени точности прогнозирования неисправностей колёсной оси путем сопоставления информации о перегреве колёс и, напротив, их недостаточном нагреве.

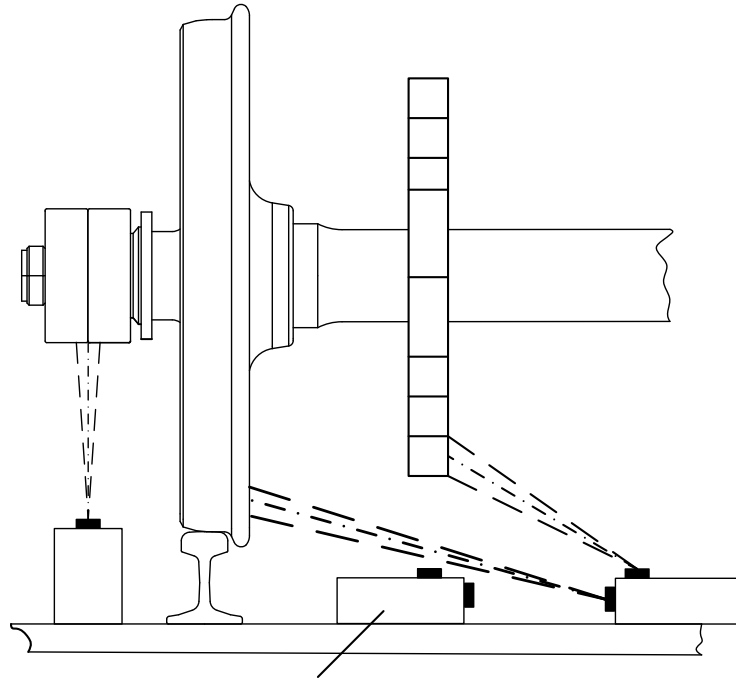
Подводя промежуточный итог, можно классифицировать современные СТК на три категории в зависимости от количества применяемых в аппаратуре инфракрасных датчиков и ориентации оптики: одно-, двух- и многоэлементные СТК (см. рисунок 1.5). Предлагается рассмотреть находящиеся в эксплуатации СТК колодочных тормозов и буксовых узлов, являющихся составными частями комплексных СТК ходовых частей [73; 97]. На рисунке 1.5 приведены реализации самых распространенных на сети Европейских железных дорог СТК.



а) ориентация ИК-оптики в одноэлементной СТК (на примере СТК HOA50, Ansaldo STS)



б) в двухэлементных СТК (на примере СТК ТК99, ÖBB)



Ориентация ИК-оптики не показана

в) в многоэлементной СТК (на примере СТК FUES II EPOS)

Рисунок 1.5 – Варианты ориентации ИК-оптики в СТК различной элементности на примере европейских СТК

Аналоги показанных на рисунке 1.5 СТК используются на железных дорогах всего мира – США, Канады, Австралии, Израиля, Индии, Египта, Китая и других. Наиболее значимый интерес представляют не столько варианты ориентации инфракрасной оптики на объекты контроля, сколько применяемые системы диагно-

стических признаков, назначаемые пороговые значения теплового контроля и алгоритмы диагностирования. Как будет показано в главе 4, указанные параметры примерно одинаковы для подавляющего большинства существующих технических реализаций СТК.

Как показывает проведенный анализ, в мире существует достаточное число реализаций СТК колодочных тормозов с различными подходами к определению технического состояния тормозного узла, самым распространенным из которых является бесконтактный тепловой контроль. Тем не менее, в отечественной практике при наличии богатого опыта в реализации теплового контроля буксовых узлов подвижного состава в настоящее время отсутствует решение вопроса о контроле колодочных тормозов. Очевидно, что уровень развития техники и промышленности, в особенности, в области разработки и производства чувствительных, быстродействующих приемников ИК-излучения с высоким пространственным разрешением, позволяет создать автоматические системы для оценки технического состояния колодочных тормозов подвижного состава.

1.3 Общие сведения о методах исследования тепловых процессов при взаимодействии колеса и тормозной колодки

1.3.1 Аналитическое решение задачи по определению максимальных температур колеса и полей распределения температур при колодочном торможении

Тепловые процессы при торможении достаточно подробно рассмотрены в работах [32; 33]. В них рассматриваются аналитические подходы к оценке различных параметров тепловых процессов при торможении с некоторыми упрощениями и допущениями. Рассмотрим более подробно основные положения этих работ в разрезе теплового состояния колеса.

Условия нагрева при торможении характеризуются величиной критерия Фурье, вычисляемого по формуле:

$$F_o = at / b^2, \quad (1.6)$$

где $a = \lambda / \gamma c$ – коэффициент температуропроводности (λ , γ , c – соответственно коэффициент теплопроводности, плотность, удельная теплоемкость материала);

t – время торможения;

b – толщина нагреваемого тела.

Процесс распространения тепла в фрикционной паре возможно рассматривать на основе однородного уравнения теплопроводности трения двух полуограниченных тел:

$$\frac{\partial (\Delta\tau)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 (\Delta\tau)}{\partial x^2}, \quad (1.7)$$

где $\Delta\tau$ – повышение температуры в момент времени t на глубине x от поверхности трения.

Для начальных условий при $t = 0$, $\Delta\tau = 0$ и импульсного выделения на нагреваемой поверхности количества тепла решение уравнения (1.7) имеет вид:

$$\Delta\tau = \frac{\bar{q}}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}} e^{-\frac{x^2}{4at}}. \quad (1.8)$$

В работе [33] сделано предположение о постоянстве тормозной силы. Таким образом, изменение плотности теплового потока представляется в виде наклонной прямой линии (рисунок 1.6).

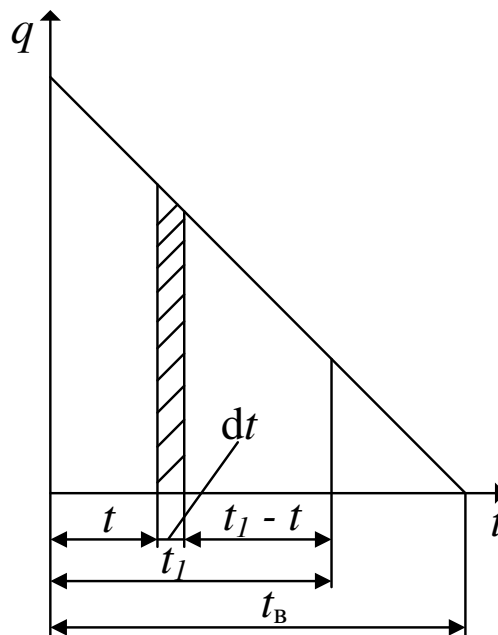


Рисунок 1.6 – Изменение плотности теплового потока в зависимости от времени остановочного торможения [33]

В действительности зависимость плотности теплового потока от времени торможения имеет несколько нелинейный характер, что будет показано в дальнейшем при рассмотрении современных подходов к оценке плотности теплового потока, возникающего между колесом и колодкой в процессе торможения.

Далее на основании уравнения (1.8) и рисунка 1.6 получено выражение для оценки изменения температуры $d(\Delta\tau)$ к моменту t_1 :

$$d(\Delta\tau) = \frac{q(t)dt}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}\sqrt{t}} e^{-\frac{x^2}{4a(t_1-t)}}. \quad (1.9)$$

С учетом отдачи тепла с поверхности трения в окружающую среду имеем:

$$q(t) = q_0 \left(1 - \frac{t}{t_B}\right) - \alpha\Delta\tau_B, \quad (1.10)$$

где q_0 – плотность теплового потока в начальный момент;

α – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду;

$\Delta\tau_B$ – избыточная по сравнению с окружающей средой температура поверхности трения.

Подставив $q(t)$ из выражения (1.10) в уравнение (1.9), получим:

$$d(\Delta\tau) = \frac{q_0 \left(1 - \frac{t}{t_B}\right) - \alpha\Delta\tau_B}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}\sqrt{t}} e^{-\frac{x^2}{4a(t_1-t)}} dt. \quad (1.11)$$

Определяя среднюю температуру на поверхности катания колеса при торможении, в работе [33] пренебрегают вращением колес относительно колодок (т.е. движением источников тепла относительно поверхности катания колеса) и предполагают подвод тепла по всей геометрической поверхности контакта. В действительности выделение тепла происходит в пятнах фактического контакта, общая площадь которых значительно меньше предполагаемой. Для достаточно жестких чугуновых колодок она может составлять всего 3-8% геометрической поверхности, а для более эластичных композиционных – 20-30%. Поэтому плотность теплового потока в пятне фактического контакта, особенно чугуновых колодок, может дости-

гать значительных величин, вызывающих резкое локальное увеличение температуры (температурную вспышку). Температурные вспышки перемещаются при трении в соответствии с изменением давлений в месте контакта.

Уравнение (1.11) для поверхности трения можно записать в виде:

$$d(\Delta\tau_{\text{II}}) = \frac{q_0 \left(1 - \frac{t}{t_{\text{B}}}\right) - \alpha \Delta\tau_{\text{II}}}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c} \sqrt{t}} dt. \quad (1.12)$$

В предположении линейного убывания коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - \frac{t}{t_{\text{B}}}\right), \quad (1.13)$$

получаем решение линейного дифференциального уравнения (1.12) первого порядка с правой частью:

$$\Delta\tau_{\text{II}} = \frac{q_0}{\alpha_0} + C e^{-\frac{\alpha_0}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}} 2\sqrt{t_1-t} \left[t - \frac{1}{t_{\text{B}}} \left(\frac{2}{3}t_1 + \frac{1}{3}t \right) \right]}. \quad (1.14)$$

Произвольная постоянная C интегрирования определяется из начальных условий. При $t = 0$, $\Delta\tau_{\text{II}} = 0$:

$$C = -\frac{q_0}{\alpha_0} e^{-\frac{\alpha_0}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}} 2\sqrt{t_1} \left[1 - \frac{2}{3} \frac{t_1}{t_{\text{B}}} \right]},$$

$$\Delta\tau_{\text{II}} = \frac{q_0}{\alpha_0} \left(1 - e^{-\frac{\alpha_0}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}} \left\{ 2\sqrt{t_1-t} \left[t - \frac{1}{t_{\text{B}}} \left(\frac{2}{3}t_1 + \frac{1}{3}t \right) \right] - 2\sqrt{t_1} \left[1 - \frac{2}{3} \frac{t_1}{t_{\text{B}}} \right] \right\}} \right). \quad (1.15)$$

Для процесса торможения необходимо принять $t_1 = t$. При этом из выражения (1.15) получаем:

$$\Delta\tau_{\text{II}} = \frac{q_0}{\alpha_0} \left(1 - e^{-2 \frac{\alpha_0}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}} \sqrt{t_1} \left(1 - \frac{2}{3} \frac{t_1}{t_{\text{B}}} \right)} \right). \quad (1.16)$$

Максимум температуры по выражению (1.16) достигается при $t = t_{\text{B}} / 2$:

$$\Delta\tau_{\text{п max}} = \frac{q_0}{\alpha_0} \left(1 - e^{-0,9433 \frac{\alpha_0}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}} \sqrt{t_B}} \right), \quad (1.17)$$

а в момент остановки при $t = t_B$:

$$\Delta\tau_{\text{п к}} = \frac{q_0}{\alpha_0} \left(1 - e^{-0,667 \frac{\alpha_0}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}} \sqrt{t_B}} \right), \quad (1.18)$$

Для установившегося торможения с постоянной скоростью ($t_B \rightarrow \infty$):

$$\Delta\tau_{\text{п } \infty} = \frac{q_0}{\alpha_0} \left(1 - e^{-\frac{\alpha_0}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}} \sqrt{t_B}} \right). \quad (1.19)$$

Для оценки совокупности значений температур в нагреваемом теле (поля температур) в любой момент времени используются выражения, приведенные далее. Повышение температуры на расстоянии x от поверхности трения определяется на основании уравнения (1.9), предполагая, что выделяющееся на поверхности трения количество тепла убывает пропорционально времени, т.е.:

$$d(\Delta\tau) = \frac{q_0 \left(t - \frac{t}{t_B} \right)}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c} \sqrt{t_1 - t}} e^{-\frac{x^2}{4a(t_1-t)}} dt. \quad (1.20)$$

Интегрируя левую часть последнего уравнения в пределах от 0 до $\Delta\tau$, а правую – от 0 до t , получаем:

$$\begin{aligned} \Delta\tau = & \frac{q_0}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}} \left\{ \left(2 - \frac{4}{3} \frac{t_1}{t_B} - \frac{1}{3} \frac{x^2}{at_B} \right) \sqrt{t_B} e^{-\frac{x^2}{4at_1}} - \right. \\ & - \frac{4}{3} \sqrt{t_1 - t} \left(1 - \frac{t_1}{t_B} - \frac{x^2}{4at_B} \right) e^{-\frac{x^2}{4a(t_1-t)}} - x \sqrt{\frac{\pi}{a}} \left(1 - \frac{t_1}{t_B} - \right. \\ & \left. \left. - \frac{1}{6} \frac{x^2}{at_B} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4a(t_1-t)}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4at_1}} \right) \right] \right) \right\}. \quad (1.21) \end{aligned}$$

Расчет поля повышения температур с использованием выражения (1.21) производится для процесса торможения при $t = t_1$, для процесса охлаждения после

окончания торможения принимается $t = t_b$, величина t_1 принимает при этом значение текущего времени t . Для установившегося торможения с постоянной скоростью во всех выражениях следует принять $t_b \rightarrow \infty$.

В работе [33] получены аналитические выражения для поля повышения температур при остановочном торможении, установившемся торможении с постоянной скоростью, охлаждении при остановочном торможении и после установившегося торможения с постоянной скоростью.

По данным выражениям выполнены расчеты [33] повышения температуры в колесах на различной глубине в зависимости от времени торможения. Приведем результаты этих расчетов на рисунке 1.7.

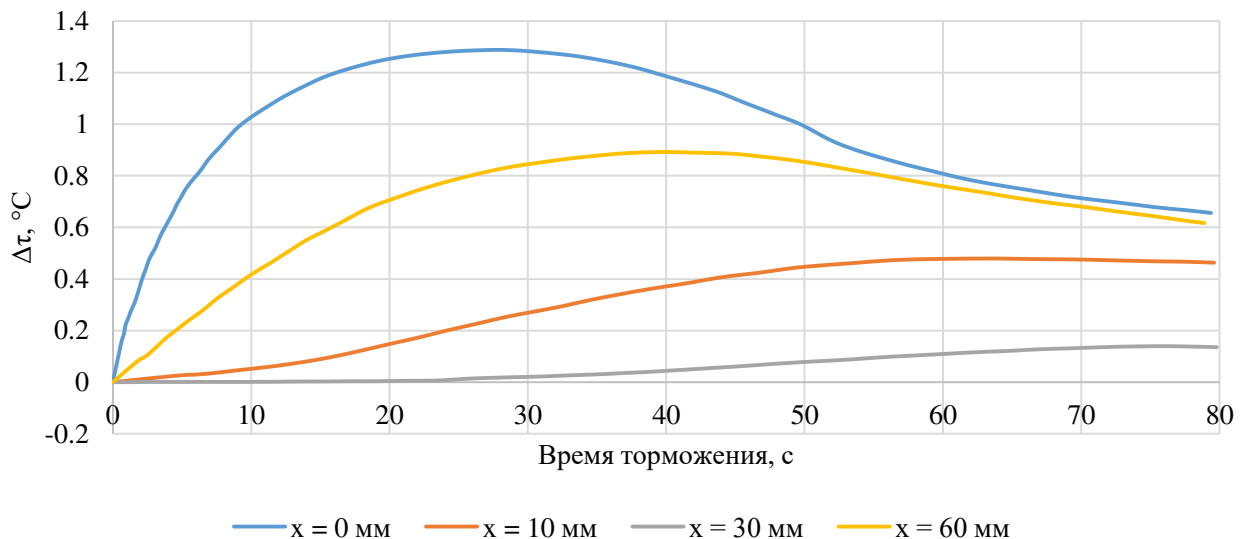


Рисунок 1.7 – Графики изменения температуры в зависимости от времени торможения на различной глубине от поверхности трения

По приведенному графику видно, что наиболее интенсивное изменение температуры происходит на поверхности трения. Её максимум достигается в середине торможения. В момент остановки величина повышения температуры на поверхности трения составляет около 0,7 максимальной, а после остановки достигает половины имевшегося при торможении максимального значения через промежуток времени, равный половине времени торможения. Чем больше глубина от поверхности трения, тем медленнее происходит изменение температуры, а достижение её мак-

симула все более запаздывает. На некоторой глубине повышение температуры продолжается после окончания процесса торможения за счет притока тепла из более нагретых слоев колеса. В главе 3 эти утверждения и полученные расчетные данные подтверждены результатами имитационного моделирования.

1.3.2 Применение численных методов математического моделирования в исследовании тепловых процессов при взаимодействии колеса с тормозной колодкой

Для решения задач по исследованию нестационарных процессов теплопереноса рациональным и эффективным является применение метода конечных элементов (МКЭ). Оценка температурного распределения, определение картин нагрева колёс при торможении, изменения температур на протяжении исследуемого режима предполагает решение нестационарной задачи теплопроводности. С целью повышения достоверности результатов и улучшения сходимости решения в таких задачах целесообразно применять малый шаг по времени. Для исследования нагрева колеса и тормозной колодки в процессе торможения целесообразно применение явной схемы интегрирования с малым шагом по времени. Её применение обосновано физической природой исследуемого процесса, который сопровождается непрерывным изменением температуры контактирующих тел в достаточно широком диапазоне значений. В соответствии с [32] процесс торможения исследуется в т. ч. при длительных режимах (до 1200 с). В этой связи явная схема является более предпочтительной с точки зрения снижения временных затрат и вычислительных мощностей, поскольку не требует составления и решения на каждом шаге систем уравнений высокого порядка.

Явная схема решения задач [95; 96] основана на применении правила явного аналитического интегрирования с использованием диагональных, или «сосредоточенных», матриц масс элементов. Уравнения движения твердого тела интегрируются с использованием правила явного центрально-разностного интегрирования:

$$\dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} = \dot{u}^{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \ddot{u}^{(i)}, \quad (1.22)$$

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \dot{u}^{(i+\frac{1}{2})}, \quad (1.23)$$

где \dot{u} – скорость;

\ddot{u} – ускорение.

Верхний индекс (i) обозначает номер шага по времени, а $(i-\frac{1}{2})$ и $(i+\frac{1}{2})$ – промежуточные значения. Оператор центрально-разностного интегрирования называется явным, поскольку кинематическое состояние системы описывается рассчитываемыми на предыдущем шаге значениями скорости $\dot{u}^{(i-\frac{1}{2})}$ и ускорения $\ddot{u}^{(i)}$. Правило явного интегрирования достаточно простое, однако само по себе оно не обеспечивает высокой производительности вычислений. Вычислительная эффективность явной схемы интегрирования заключается в использовании диагональных матриц масс элементов, поскольку обращение матриц масс, используемое при вычислении значений ускорений в начале каждого шага, проводится одновременно по трем осям:

$$\ddot{u}^{(i)} = M^{-1} \cdot (F^{(i)} - I^{(i)}), \quad (1.24)$$

где M – диагональная сосредоточенная матрица масс;

F – вектор внешних сил;

I – вектор внутренних сил.

Таким образом, явная схема интегрирования не требует вычисления тангенциальных матриц жесткости и применения итерационного метода.

При рассмотрении процессов теплопереноса исходим из предположения, что рассматриваемое тело подчиняется закону Фурье. Согласно ему, тепловой поток q пропорционален градиенту температуры $\partial\theta$, причем коэффициентом пропорциональности является коэффициент теплопроводности k материала, из которого состоит тело:

$$q = -k \frac{\partial\theta}{\partial x}, \quad (1.25)$$

Знак «минус» иллюстрирует физическую закономерность, при которой положительный тепловой поток вдоль направления оси x вызывает снижение температуры в данном направлении $\partial\theta/\partial x < 0$.

Рассмотрим объемное тело на рисунке 1.8. В направлении осей x , y и z имеем:

$$q_x = -k_x \frac{\partial\theta}{\partial x}, q_y = -k_y \frac{\partial\theta}{\partial y}, q_z = -k_z \frac{\partial\theta}{\partial z}, \quad (1.26)$$

где q_x, q_y, q_z – тепловые потоки в направлении указанных осей;

k_x, k_y, k_z – коэффициенты теплопроводности в направлении указанных осей.

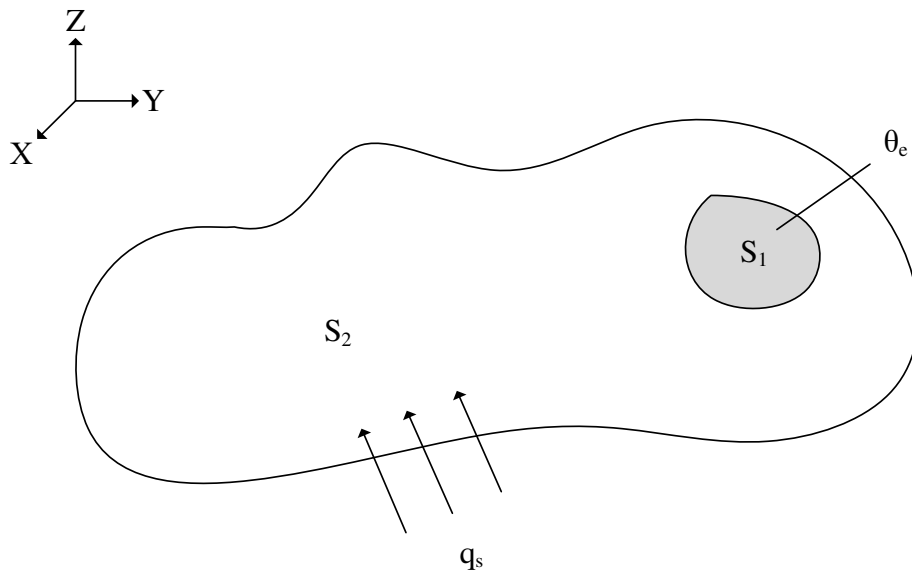


Рисунок 1.8 – Тело, подвергнутое воздействию теплопередачи

Таким образом, распределение температур в рассматриваемом теле описывается известным уравнением теплопроводности в сплошной среде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial\theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial\theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial\theta}{\partial z} \right) = -q_B, \quad (1.27)$$

где q_B – источник тепла внутри тела, который считается положительным, если тепло подводится к телу.

С уравнением (1.26) связано два типа граничных условий. При известной температуре на некоторой части границы тела:

$$\theta = \theta_B(S), \quad (1.28)$$

где T_B – температура на границе, которая может быть функцией координат точек поверхности S . Если же на границе происходит конвективный теплообмен, характеризуемый коэффициентом теплообмена h и разностью температур тела и окружающей среды $(\theta - \theta_\infty)$, то граничное условие имеет вид:

$$\left(k_X \frac{\partial \theta}{\partial x}\right)l_x + \left(k_Y \frac{\partial \theta}{\partial y}\right)l_y + \left(k_Z \frac{\partial \theta}{\partial z}\right)l_z + h(\theta - \theta_\infty) = -q_B, \quad (1.29)$$

где l_x, l_y, l_z – направляющие косинусы.

При этом поток тепла q_B и потери тепла в результате конвекции $h(\theta - \theta_\infty)$ не могут находиться на одном и том же участке поверхности тела, т.е. при наличии отвода или притока тепла за счет теплового потока потери тепла вследствие явления конвекции отсутствуют.

Матрица теплопроводности элемента имеет следующий вид:

$$[k^{(e)}] = \int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] dV + \int_{S_2^{(e)}} h [N^{(e)}]^T [N^{(e)}] dS. \quad (1.30)$$

Матрица $[N^{(e)}]$ содержит функции формы. Матрица $[D^{(e)}]$ содержит значения коэффициентов теплопроводности:

$$[D^{(e)}] = \begin{bmatrix} K_x^{(e)} & 0 & 0 \\ 0 & K_y^{(e)} & 0 \\ 0 & 0 & K_z^{(e)} \end{bmatrix}. \quad (1.31)$$

Матрица $[B^{(e)}]$ получается дифференцированием матрицы $[N^{(e)}]$ по различным осям. Для определения $[B^{(e)}]$ используется соотношение:

$$\{g\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial x} \\ \frac{\partial \theta}{\partial y} \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} \end{Bmatrix} = [B^{(e)}] \{\theta\}. \quad (1.32)$$

Вектор-столбец правых частей уравнений для элемента определяется следующим соотношением:

$$[f^{(e)}] = - \int_{V^{(e)}} [N^{(e)}]^T Q dV + \int_{S_1^{(e)}} [N^{(e)}]^T q dS - \int_{S_2^{(e)}} [N^{(e)}]^T \theta_\infty h dS. \quad (1.33)$$

1.4 Постановка задач исследования

Выполненный анализ экспериментальных и теоретических исследований тепловых процессов при колодочном торможении показал, что данные о степени нагрева колеса при колодочном торможении противоречивы. При сходных режимах торможения исследователи получали различные результаты. Основная часть теоретических исследований базируется на плоских осесимметричных моделях. Это приводит к тому, что описание работы рассматриваемого узла не является достаточно точным с количественной и качественной точек зрения. Трудно переоценить значимость накопленной экспериментальной и теоретической базы по исследованиям тепловых процессов при колодочном торможении, однако в настоящее время в свете заинтересованности ключевых игроков железнодорожной отрасли в применении экономически выгодных СТК требуется создание комплексных имитационных моделей наиболее ответственных узлов подвижного состава. Такие модели должны всесторонне описывать работу диагностируемого узла, определять признаки неисправностей с выбором ограниченного числа характеристик, показателей и параметров, которые должны контролироваться в процессе диагностирования. Таким образом, очевидна потребность в разработке комплексной диагностической модели теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава.

Анализ технических решений и тенденций в направлении совершенствования диагностического обеспечения бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава показывает, что имеются следующие его направления:

- определение наиболее информативных зон контроля, наилучшим образом отражающих степень нагрева колеса;
- определение пороговых значений работоспособности колодочных тормозов при тепловом контроле;
- разработка системы диагностических признаков и алгоритмов оценки работоспособности колодочных тормозов.

Решение данных задач требует комплексного подхода к изучению процесса нагрева колеса при колодочном торможении, состоящего в теоретическом исследовании вопроса методами математического моделирования и проведении экспериментальных исследований с целью подтверждения корректности результатов, получаемых при моделировании.

Цель настоящей работы.

Совершенствование диагностического обеспечения бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов грузового подвижного состава на основе:

- разработки комплексной диагностической модели теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава, включающую:
 - компьютерную модель нагрева колеса с учетом типа торможения и параметров тормозной системы,
 - компьютерную модель определения траектории зоны сканирования при диагностике и вычисления уровня сигнала ИК-излучения;
- разработки диагностического обеспечения в части алгоритмов, системы диагностических признаков, выбора наиболее рациональной зоны на колесе для осуществления теплового контроля, выбора пороговых значений работоспособности колодочных тормозов при тепловом контроле.

При этом необходимо решить следующие задачи:

5. Разработать математическую модель нагрева колеса с учетом типа торможения, параметров тормозной системы.
6. Разработать математическую модель определения траектории зоны сканирования при диагностике и вычисления уровня сигнала ИК-излучения и её компьютерную реализацию.
7. Выполнить исследования на разработанной диагностической модели для оценки влияния на степень и характер нагрева колёс, форму получаемого СТК колодочных тормозов сигнала, различных факторов.
8. Подтвердить адекватность разработанных компьютерных моделей на основе экспериментальных данных по мониторингу нагрева колёс в реальных условиях эксплуатации.

9. Провести исследования по выбору пороговых значений работоспособности колодочных тормозов при осуществлении теплового контроля.

10. Обосновать выбор наиболее рациональной зоны на колесе для осуществления теплового контроля.

11. Разработать систему диагностических признаков и алгоритмы бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов грузового подвижного состава.

Решение данных задач в перспективе поможет снизить эксплуатационные расходы на железной дороге путём своевременного обнаружения неисправных колодочных тормозов и надлежащей диагностики причин возникновения перегрева или отсутствия нагрева колёс. Наиболее важной составляющей в этом вопросе, тем не менее, остается повышение безопасности функционирования железнодорожного транспорта.

2 РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЕСКОНТАКТНОГО ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для определения рациональных параметров СТК колодочных тормозов необходимо исследование нагрева колеса при различных режимах торможения, параметрах тормозной системы, условиях окружающей среды, а также оценка параметров сигнала, получаемого приемником ИК-излучения СТК, при осуществлении теплового контроля. Для решения этих задач целесообразно применение методов имитационного математического моделирования.

2.1 Общие сведения о конструкции, применяемых материалах для изготовления колёс и тормозных колодок различных типов, особенностях их взаимодействия

2.1.1 Конструкция колёс и тормозных колодок. Материалы

В процессе торможения между колесом и тормозной колодкой возникают силы трения, вызывающие нагрев обода, что способствует возникновению целого ряда дефектов термомеханического характера – ползунов, наволакивания металла, кольцевых выработок, глубоких рисок, термоциклических трещин, выщербин [58]. Дефекты тормозного происхождения приводят к нарушению макрогеометрии колеса, увеличению интенсивности динамического воздействия на узлы экипажной части вагона и преждевременному выходу колёс из строя.

Колёса вагонов по конструкции бывают цельнокатаными и бандажными, а по способу изготовления – литыми и катаными. В настоящей работе в дальнейшем будем рассматривать вопросы, касающиеся цельнокатаных колёс грузовых вагонов. Требования к их конструкции, составу и свойствам материалов устанавливаются ГОСТ 10791-2011 [11]. Конструктивно цельнокатаное колесо состоит из обода, диска и ступицы. Ступица колеса запрессовывается на ось, а дисковая часть колеса выполняется под некоторым углом для снижения динамических воздействий со стороны пути.

Колёса грузовых вагонов изготавливаются из стали марки 2. Механические и теплофизические свойства колесной стали приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Механические и теплофизические свойства колесной стали

Показатель	Значение
Твердость по Бринеллю на глубине 30 мм от поверхности катания, НВ	255
Временное сопротивление, МПа	910...1110
Плотность, кг/м ³	7850
Модуль Юнга, МПа	$2,1 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0,28
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	486
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	79
Коэффициент линейного расширения, $10^{-6} \cdot \text{К}^{-1}$	11,6

В настоящее время на железных дорогах России применяются два вида тормозных колодок: чугунные и композиционные (ТИИР-300, ТИИР-303 и ТИИР-308). Чугунные колодки используются на пассажирских вагонах с конструкционной скоростью до 120 км/ч и некоторых типах грузовых вагонов. Основное достоинство чугунных колодок заключается в относительно высоком значении показателя теплопроводности (50 Вт/м·К), что обеспечивает эффективный отвод тепловой энергии из зоны трения при торможении и снижение общей тепловой нагрузки на колесо. Несмотря на это, чугунные колодки относительно недолговечны и не в состоянии обеспечить стабильность коэффициента трения при различных скоростях движения. Это, во-первых, приводит к увеличению объема работ по замене самих колодок и последующей регулировке тормозной рычажной передачи, а во-вторых, – к необходимости применения регуляторов сил нажатия колодок в зависимости от скорости движения.

Конструкция и размеры чугунных колодок регламентированы ГОСТ 1205 [10]. Состав и свойства чугуна для тормозных колодок обычно соответствуют стандартам ОСТ 32.194 [56] и ТУ 32 ЦТВР-279-89 «Колодки чугунные тормозные для вагонов и тендеров железных дорог колеи 1520 (1524) мм». В рамках настоящей работы рассматриваются колодки, по составу и свойствам соответствующие ОСТ

32.194. Сводная информация о механических и теплофизических свойствах чугуна для колодок приведена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Механические и теплофизические свойства чугуна для тормозных колодок (тип «С»)

Показатель	Значение	
	Твердость по Бринеллю, НВ	тело колодки
ушко		не более 321
Разрушающая нагрузка, кН	156,8	
Плотность, кг/м ³	7200	
Модуль Юнга, МПа	1,6·10 ⁵	
Коэффициент Пуассона	0,23...0,27	
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	540	
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	50	
Коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ ·К ⁻¹	10	

Композиционные колодки применяются как на пассажирских вагонах, так и на всех типах грузовых вагонов. От чугунных их отличает высокая износостойкость (до 3-5 раз долговечнее) и стабильность коэффициента трения относительно скорости движения. Существенным недостатком является низкая теплопроводность композитного состава (3 Вт/м·К), вследствие чего в процессе торможения увеличивается уровень тепловой нагрузки на колёса. Это вызывает возникновение дефектов термомеханического характера на поверхности катания колеса. В осенне-зимний период из-за высокой влажности требуется просушка тормозов путем их периодического включения. Кроме того, существует возможность возгорания композиционных колодок и возникновение неприятного запаха при торможении.

Нормативные требования к композиционным тормозным колодкам в части конструкции и применяемых материалов отсутствуют. Данный тип колодок изготавливается по ТУ 38.114292-94 [80], ТУ 2571-028-00149386-2000 [81]. В настоящей работе будем рассматривать композиционные тормозные колодки, изготавливаемые из полимерного композита ТИИР-300, прототипом которого является композит 6КВ-10. Его химический состав: асбест – 15%, каучук – 20%, барит – 47,5%, сажа – 15% и вулканизирующий состав (сера и др.) – 2,5%. Требования к свойствам

полимерных композиционных материалов для тормозных колодок устанавливаются в требованиях по сертификации ФТС ЖТ ЦВ-ЦЛ 099-99. Сводная информация о механических и теплофизических свойствах полимерного композита ТИИР-300 приведена в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Механические и теплофизические свойства полимерного композиционного материала для тормозных колодок

Показатель	Значение
Твердость по Бринеллю, НВ	1,4...3,0
Предел прочности при сжатии, МПа	15,0
Плотность, кг/м ³	2100
Модуль Юнга, МПа	$1,0 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0,23...0,27
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	430
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	3,3
Коэффициент линейного расширения, $10^{-6} \cdot \text{К}^{-1}$	30

В последние годы в России ведутся теоретические и экспериментальные исследования по вопросам применения металлокерамических колодок. Однако массового применения как за рубежом они не получили вследствие их высокой стоимости [6].

2.1.2 Особенности взаимодействия колёс и тормозных колодок

Дефекты колёс при использовании чугунных и композиционных тормозных колодок во многом имеют сходство между собой, несмотря на то, что композиционные колодки по своему составу, технологии изготовления и механизмам изнашивания существенно отличаются от металлических колодок [57].

Согласно результатам исследования [2], износ чугунных колодок происходит за счет интенсивного схватывания контактирующих поверхностей. Отдельно стоит отметить технологические дефекты чугунных колодок – металлизированный пригар, остатки формовочной земли, локальные неровности повышенной твердости, которые приводят к появлению кольцевых выработок, глубоких рисок на колесах и наволакиванию металла.

Локальные зоны наволакивания металла, имеющие неоднородную твердость и относительно небольшие размеры, остаются на поверхности катания колес и закатываются, а более крупные – отделяются от колеса и переносятся на контактную поверхность колодки. Особенно интенсивно металл колеса наволакивается на колодку в период приработки вследствие литейных (технологических) дефектов на поверхности трения. Это ведет к увеличению контактного давления и сдвиговых напряжений, являющихся одним из наиболее критических факторов нагрева контактирующих поверхностей. Таким образом, в совокупности с локальными зонами высокой твердости и острыми неровностями происходит, вырыв металла колеса и его перенос на колодку. В дальнейшем в условиях продолжающегося торможения вырванный металл раскатывается по поверхности колодки и к взаимодействию пары «чугун – сталь» добавляется трение колесной стали о продукты изнашивания в виде стальных полосок на поверхности колодки. Их площадь может достигать 20% контактной площади колодки в результате чего происходит интенсивный износ поверхности катания колеса и образование кольцевых выработок и глубоких рисок.

Износ композиционных колодок происходит за счет медленного абразивно-окислительного процесса разрушения сопряженных поверхностей. Низкое значение коэффициента теплопроводности резко снижает эффективность их применения. Изнашивание композиционных тормозных колодок сопровождается образованием в их мягкой основе металлических включений (по химическому составу идентичных колесной стали) при взаимодействии с колесом и разрушении поверхности трения. При этом механизм возникновения металлических включений на композиционной колодке представляет собой процесс консолидации – спекания продуктов износа. Под действием сил трения, интенсивной пластической деформации, явления диффузии, фазовых переходов эти включения достигают размеров 30-40 мм. От подобных включений на чугунных колодках данные отличаются большей мелкозернистостью.

2.2 Компьютерная модель нагрева колеса при колодочном торможении

Разработанная компьютерная модель [72; 105] является составной частью комплексной имитационной модели теплового контроля колодочных тормозов и состоит из двух связанных блоков. Общий алгоритм работы модели приведен на рисунке 2.1.

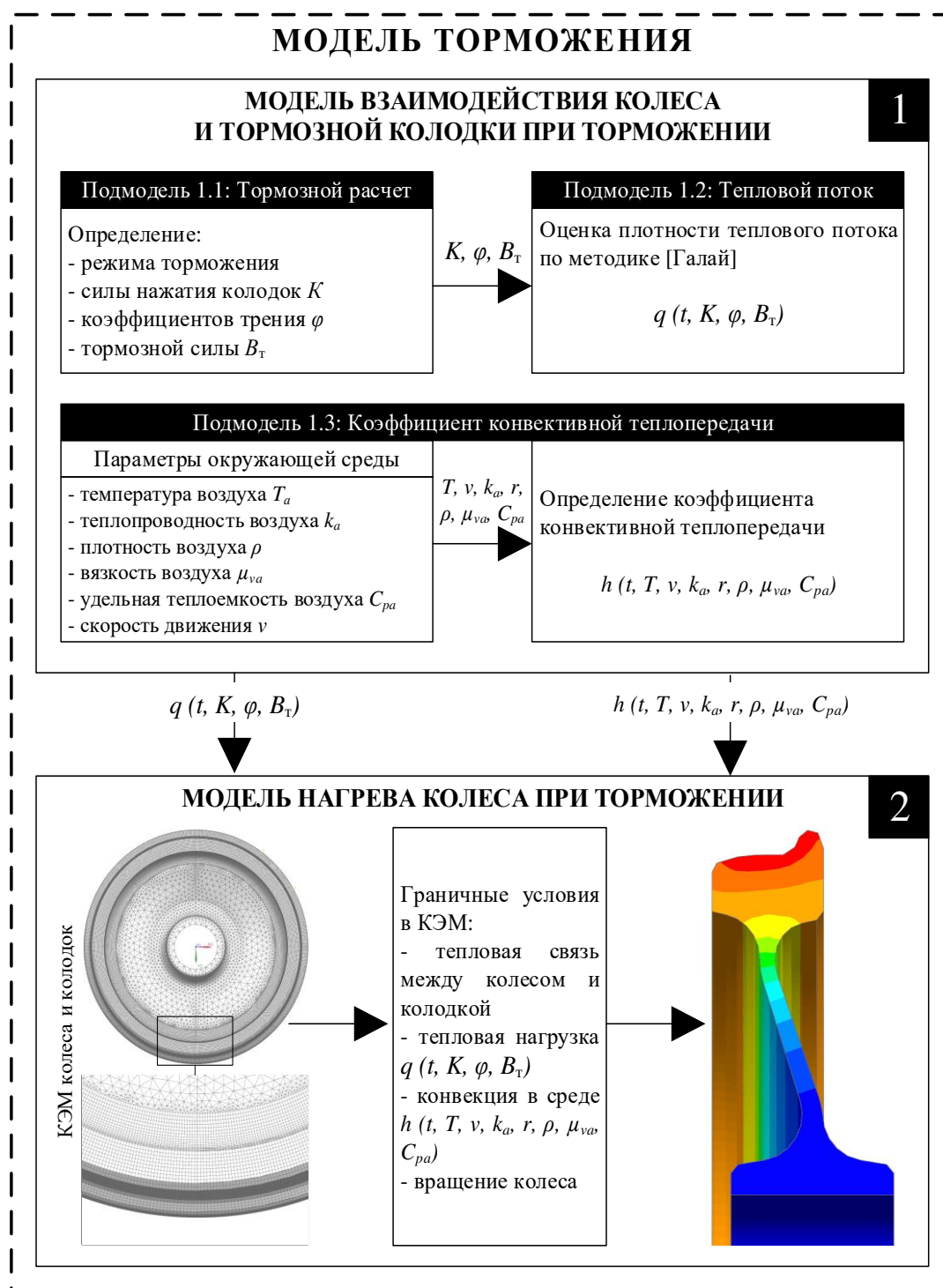


Рисунок 2.1 – Алгоритм работы модели торможения

В *первом блоке* (рисунок 2.1) решается задача определения плотности теплового потока при различных режимах торможения и условиях окружающей среды. Для этого блок разделен на две связанные подмодели и одну дополнительную. Подмодель 1.1 предполагает проведение тормозного расчета с целью определения основных параметров торможения: режима воздухораспределителя, силы нажатия тормозных колодок на колесо, зависимостей коэффициентов трения от скорости движения и типа применяемой колодки, тормозной силы, действительного тормозного пути, времени торможения. Выходные данные подмодели 1.1 являются входными данными подмодели 1.2, предназначенной для определения плотности теплового потока между колесом и колодкой. Рассмотрим работу этих подмоделей более подробно.

2.2.1 Расчет исходных данных к моделированию нагрева колеса в различных режимах торможения с учетом различных факторов

Элементы расчета времени торможения и действительного тормозного пути. Для корректного описания процессов нагрева колеса при колодочном торможении необходим учет значительного количества параметров, оказывающих влияние на процесс торможения. Бóльшая часть параметров так или иначе определяется по результатам расчета времени торможения и действительного тормозного пути. При этом основное влияние на степень и характер нагрева колеса влияют режим торможения, масса вагона и скорость его движения. Параметры торможения определяются Инструкцией по эксплуатации тормозов подвижного состава железных дорог №ЦТ-ЦВ-ЦЛ-ВНИИЖТ/277 и Правилами тяговых расчетов [64]. Для автоматизации расчета и последующей передачи исходных данных в среде табличного процессора Microsoft Excel реализована подмодель 1.1 (рисунок 2.1). При определении исходных данных к моделированию нагрева принимаются следующие допущения:

- торможение поезда имеет равнозамедленный характер;
- сила нажатия на тормозные колодки постоянна в течение времени торможения;

– рассматривается торможение грузовых поездов, состоящих из четырехосных вагонов, с общим числом осей не более 200.

Кратко рассмотрим общую последовательность расчета и отметим, что параметры, для которых не указаны расчетные зависимости, определялись в соответствии с нормативными документами.

1. По следующей зависимости определяется тормозная сила:

$$B_T = 1000 \sum K \varphi_k, \quad (2.1)$$

где K – действительная сила нажатия тормозной колодки принимается в зависимости от режима торможения, на который включен воздухораспределитель, в соответствии с инструкцией для четырехосных грузовых вагонов;

φ_k – действительный коэффициент трения тормозной колодки.

2. Действительные коэффициенты трения тормозных колодок в зависимости от скорости движения вагона V и действительной силы нажатия колодки K рассчитываются по известным эмпирическим зависимостям:

– для стандартных чугунных колодок:

$$\varphi_k = 0,6 \cdot \frac{16K + 100}{80K + 100} \cdot \frac{V + 100}{5V + 100}; \quad (2.2)$$

– для композиционных колодок:

$$\varphi_k = 0,44 \cdot \frac{K + 20}{4K + 20} \cdot \frac{V + 150}{2V + 150}. \quad (2.3)$$

3. Тормозной путь S_T определяется методом интервалов скорости, в соответствии с которым он представляет собой сумму подготовительного тормозного пути S_{Π} и действительного пути торможения $S_{\text{д}}$:

$$S_T = S_{\Pi} + S_{\text{д}}, \quad (2.4)$$

где

– подготовительный тормозной путь определяется по зависимости:

$$S_{\Pi} = 0,278 \cdot \vartheta_0 t_{\Pi}, \quad (2.5)$$

где ϑ_0 – скорость поезда в момент начала торможения;

t_{Π} – время подготовки тормозов к действию;

– действительный путь торможения:

$$S_{\text{д}} = \frac{500 \cdot (\vartheta_{\text{н}}^2 - \vartheta_{\text{к}}^2)}{\zeta \cdot (1000 \vartheta_{\text{р}} \varphi_{\text{кр}} + \omega_{\text{ох}} + \omega_{\text{с}})}, \quad (2.6)$$

где $\vartheta_{\text{н}}$, $\vartheta_{\text{к}}$ – начальная и конечная скорости в расчетном интервале;

ζ – замедление поезда под действием удельной замедляющей силы;

$\omega_{\text{ох}}$ – основное удельное сопротивление движению поезда при холостом ходе локомотива;

$\omega_{\text{с}}$ – удельное сопротивление от спрямленного уклона, для которого производятся расчеты.

Таким образом, в подмодель 1.2 для определения плотности теплового потока, возникающего при взаимодействии тормозной колодки и колеса, передаются следующие исходные данные:

- скорость начала торможения поезда;
- действительная сила нажатия тормозной колодки;
- действительные коэффициенты трения тормозной колодки в зависимости от скорости движения вагона;
- тормозной путь поезда (с целью определения приблизительного количества оборотов, которые совершит колесо за время торможения).

Методы расчета тепловых потоков при трении, а также вследствие явлений теплопроводности и излучения. При колодочном торможении в результате совместного влияния различных факторов (трение, теплопроводность, излучение) в колесо и колодку направлены тепловые потоки q_1 и q_2 соответственно:

$$q_1 = q_{\text{теп}} + q_{\text{изл}} - f_1 \cdot q_{\text{тр}}, \quad (2.7)$$

$$q_2 = -q_{\text{теп}} - q_{\text{изл}} - f_2 \cdot q_{\text{тр}}, \quad (2.8)$$

где $q_{\text{тр}}$ – тепловой поток, возникающий вследствие трения между соприкасающимися поверхностями;

$q_{\text{теп}}$ – тепловой поток, возникающий вследствие явления теплопроводности;

$q_{\text{изл}}$ – тепловой поток, возникающий вследствие явления излучения.

Существует несколько подходов к определению плотности теплового потока между контактирующими телами вследствие трения $q_{\text{тр}}$. Рассмотрим некоторые из них.

Универсальным методом определения $q_{\text{тр}}$ является применение математических моделей на основе известной модели трения Кулона. Согласно ей, контактные поверхности взаимодействующих тел могут воспринимать сдвиговые напряжения. Если значение эквивалентных сдвиговых напряжений при этом меньше, чем некоторое предельное значение сдвиговых напряжений $\tau_{\text{пр}}$, то относительного движения поверхностей не возникает. Модель трения Кулона определяется следующим выражением:

$$\tau_{\text{пр}} = \mu P, \quad (2.9)$$

где μ – коэффициент трения;

P – нормальное давление в зоне контакта.

При превышении некоторого предельного значения $\tau_{\text{пр}}$ контактные поверхности начинают движение друг относительно друга. В этом случае между контактными поверхностями возникает тепловой поток, плотность которого определяется следующей зависимостью:

$$q = K_1 \cdot \tau \cdot \vartheta, \quad (2.10)$$

где K_1 – коэффициент рассеяния энергии;

τ – эквивалентные напряжения, возникающие в результате трения;

ϑ – скорость трения.

Для определения теплового потока $q_{\text{тр}}$, возникающего при взаимодействии колеса и тормозной колодки, известно два подхода [7; 46; 47].

Первый основан на проведении предварительного тормозного расчета, исходя из силы нажатия тормозной колодки на колеса, определяемой по режиму воздухораспределителя вагона. Плотность теплового потока согласно данной методике определяется по следующей зависимости:

$$q(t) = \frac{b(t)g(t)q_0}{A}, \quad (2.11)$$

где $b(t)$ – удельная тормозная сила;

$g(t)$ – скорость движения вагона;

q_0 – осевая нагрузка вагона;

A – площадь трения тормозной колодки.

При этом методика предполагает, что тепловой поток $q(t)$ нелинейно возрастает от нуля до максимума при наполнении тормозных цилиндров сжатым воздухом. После повышения давления в тормозном цилиндре до максимума скорость поезда и тепловыделение уменьшаются до нуля.

Второй подход основан на гипотезе о том, что кинетическая энергия вагона в полном объеме преобразуется в тепловую энергию при трении тормозных колодок о колеса [46; 47]. Плотность теплового потока по данной методике определяется из выражения:

$$Q = \frac{K}{8 \cdot t \cdot S_{\text{обода}}} \cdot \alpha, \quad (2.12)$$

где K – кинетическая энергия вагона, переходящая в нагрев обода колеса;

$S_{\text{обода}}$ – площадь поверхности катания колеса;

α – коэффициент распределения теплового потока между колесом и колодкой, зависящий от свойств контактирующих материалов.

Коэффициент распределения тепловых потоков [33] количественно характеризует долю возникающего при трении тепла, которая поступает в каждое из трущихся тел. Для колеса и тормозных колодок величины этих коэффициентов (α_R и α_K) связаны зависимостью:

$$\alpha_R + \alpha_K = 1. \quad (2.13)$$

Из выражения (2.13) получаем:

$$\alpha_R = \left(\frac{\alpha_K}{\alpha_R} + 1 \right)^{-1}. \quad (2.14)$$

Количество тепла в нагреваемом при трении теле:

$$Q = \Delta\tau_{\text{ср}} \gamma c A C_{\text{эф}} \sqrt{at}, \quad (2.15)$$

где $\Delta\tau_{\text{ср}}$ – средняя температура по глубине распространения тепла;

$C_{\text{эф}} = 3,06$ – постоянный коэффициент.

С использованием дифференциального уравнения (1.20) получаем:

$$\Delta\tau_{\text{ср}} = \frac{1}{C_{\text{эф}} \sqrt{at}} \int_0^{\infty} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi \lambda \gamma c}} \int_0^t \frac{q_0 \left(1 - \frac{t}{t_B}\right)}{\sqrt{t_1 - t}} e^{-\frac{x^2}{4a(t_1 - t)}} dt \right] dx. \quad (2.16)$$

После преобразований имеем:

$$\Delta\tau_{\text{ср}} = \frac{\Delta\tau_{\text{п}} \sqrt{\pi a}}{2\sqrt{t} \left(1 - \frac{2}{3} \frac{t}{t_B}\right) C_{\text{эф}} \sqrt{at}} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{t}{t_B}\right). \quad (2.17)$$

Обозначая величины, относящиеся к колесу с индексом R , а к колодке – с индексом «к», учитывая, что количество тепла в колодке $Q_k = \alpha_k Q$, а в колесе $Q_R = \alpha_R Q$, и подставляя соответствующие величины в выражение (2.14), после сокращений получаем:

$$\alpha_R = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_k \gamma_k c_k}{\lambda_R \gamma_R c_R} \frac{F_k}{F_R} \frac{\Delta\tau_{\text{пк}}}{\Delta\tau_{\text{пR}}}}}. \quad (2.18)$$

Тепловой поток $q_{\text{теп}}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$q_{\text{теп}} = k(h, p, \bar{\theta})(\theta_1 - \theta_2) = k(h, p, \bar{\theta})\Delta\theta, \quad (2.19)$$

где $k(h, p, \bar{\theta})$ – коэффициент теплопроводности, как функция средней температуры в точке контакта тел:

$$\bar{\theta} = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2},$$

зазора h и контактного давления p , θ_1 и θ_2 – температуры контактирующих тел.

Тепловой поток $q_{\text{изл}}$ определяется по следующей зависимости:

$$q_{\text{изл}} = F \left[(\theta_1 - \theta^Z)^4 - (\theta_2 - \theta^Z)^4 \right] \quad (2.20)$$

где F – постоянная излучения, определяемая по излучательной способности тела,
 θ^Z – абсолютный ноль по используемой шкале температур.

Используя метод Галёркина, запишем слабые формулировки представленных зависимостей:

$$\int_S \delta\theta_1 q_1 dS = \int_S \delta\theta_1 (q_{\text{теп}} + q_{\text{изл}} - f_1 \cdot q_{\text{тр}}) dS, \quad (2.21)$$

$$\int_S \delta\theta_2 q_2 dS = \int_S \delta\theta_2 (-q_{\text{теп}} - q_{\text{изл}} - f_2 \cdot q_{\text{тр}}) dS. \quad (2.22)$$

Тогда вклад в вариационную формулировку теплового баланса запишется в виде:

$$\delta\Pi = \int_S (\delta\theta_1 q_1 + \delta\theta_2 q_2) dS = \int_S (\delta\Delta\theta (q_{\text{теп}} + q_{\text{изл}}) - \delta\hat{\theta} \cdot q_{\text{тр}}) dS, \quad (2.23)$$

где $\hat{\theta} = f_1\theta_1 + f_2\theta_2$, а вклад в матрицу Якоби для метода Ньютона:

$$d\delta\Pi = \int_S \left[d\delta\Delta\theta (q_{\text{теп}} + q_{\text{изл}}) + \delta\Delta\theta (dq_{\text{теп}} + dq_{\text{изл}}) - d\delta\hat{\theta} q_{\text{тр}} - d\delta\hat{\theta} \cdot dq_{\text{тр}} \right] dS, \quad (2.24)$$

В точках контакта между телами температуры могут интерполироваться по следующим зависимостям:

$$\theta_1(s) = M_1^N(s)\theta^N, \quad \theta_2(s) = M_2^N(s)\theta^N, \quad (2.25)$$

где θ^N – температура в N -ом узле, принадлежащем данному конечному элементу, находящемуся в контакте с другим телом.

Здесь и далее правило суммирования применяется для всех верхних индексов. Тогда переменные температур могут быть записаны в следующем виде:

$$\Delta\theta(s) = M^N(s)\theta^N, \quad \hat{\theta}(s) = \hat{M}^N(s)\theta^N, \quad \bar{\theta}(s) = \bar{M}^N(s)\theta^N, \quad (2.26)$$

где $\hat{M}^N(s) = f_1 M_1^N(s) + f_2 M_2^N(s)$ и $\bar{M}^N(s) = \frac{1}{2}(M_1^N(s) + M_2^N(s))$

Подставляя полученные выражения в уравнение (2.20), получаем:

$$d\delta\Pi = \delta\theta^N \int_S \left[(q_{\text{теп}} + q_{\text{изл}}) \frac{d\Delta M^N}{ds} + \Delta M^N \left(\frac{\partial q_{\text{изл}}}{\partial \theta_1} d\theta_1 + \frac{\partial q_{\text{изл}}}{\partial \theta_2} d\theta_2 + \frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial \Delta\theta} d\Delta\theta + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial \bar{\theta}} d\bar{\theta} + \frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial h} dh + \frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial p} dp \right) - q_{\text{тр}} \frac{d\hat{M}^N}{ds} ds - \right.$$

$$- \hat{M}^N \left(\frac{\partial q_{\text{тр}}}{\partial \tau} \partial \tau + \frac{\partial q_{\text{тр}}}{\partial s} \partial s \right) \Big] dS.$$

После преобразований получаем:

$$\begin{aligned} d\delta\Pi = & \delta\theta^N \int_S \left[\left((q_{\text{теп}} + q_{\text{изл}}) \frac{d\Delta M^N}{ds} - q_{\text{тр}} \frac{d\hat{M}^N}{ds} \right) ds + \Delta M^N \left(\frac{\partial q_{\text{изл}}}{\partial \theta_1} M_1^M + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\partial q_{\text{изл}}}{\partial \theta_2} M_2^M + \frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial \Delta\theta} M^M + \frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial \bar{\theta}} M^M \right) d\theta^M + \right. \\ & \left. + \Delta M^N \left(\frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial h} dh + \frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial p} dp \right) + \right. \\ & \left. + \Delta M^N \left(\frac{\partial q_{\text{изл}}}{\partial \theta_1} \frac{dM_1^K}{ds} \theta^K + \frac{\partial q_{\text{изл}}}{\partial \theta_2} \frac{dM_2^K}{ds} \theta^K + \frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial \Delta\theta} \frac{d\Delta M^K}{ds} \theta^K + \frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial \bar{\theta}} \frac{d\bar{M}^K}{ds} \theta^K \right) ds - \right. \\ & \left. - \Delta \hat{M}^N \left(\frac{\partial q_{\text{тр}}}{\partial \tau} \left(\frac{\partial \tau}{\partial p} dp + \frac{\partial \tau}{\partial \theta_1} d\theta_1 + \frac{\partial \tau}{\partial \theta_2} d\theta_2 \right) + \frac{\partial q_{\text{тр}}}{\partial s} ds \right) \Big] dS. \end{aligned}$$

В конце концов, получаем окончательное выражение:

$$\begin{aligned} d\delta\Pi = & \delta\theta^N \int_S \left[\left((q_{\text{теп}} + q_{\text{изл}}) \frac{d\Delta M^N}{ds} - q_{\text{тр}} \frac{d\hat{M}^N}{ds} \right) ds + \Delta M^N \left(\frac{\partial q_{\text{изл}}}{\partial \theta_1} M_1^M + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\partial q_{\text{изл}}}{\partial \theta_2} M_2^M + \frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial \Delta\theta} M^M + \frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial \bar{\theta}} M^M \right) d\theta^M + \right. \\ & \left. + \Delta M^N \left(\frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial h} dh + \frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial p} dp \right) + \right. \\ & \left. + \Delta M^N \left(\frac{\partial q_{\text{изл}}}{\partial \theta_1} \frac{dM_1^K}{ds} \theta^K + \frac{\partial q_{\text{изл}}}{\partial \theta_2} \frac{dM_2^K}{ds} \theta^K + \frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial \Delta\theta} \frac{d\Delta M^K}{ds} \theta^K + \frac{\partial q_{\text{теп}}}{\partial \bar{\theta}} \frac{d\bar{M}^K}{ds} \theta^K \right) ds - \right. \\ & \left. - \Delta \hat{M}^N \frac{\partial q_{\text{тр}}}{\partial \tau} \left(\frac{\partial \tau}{\partial \theta_1} d\theta_1 + \frac{\partial \tau}{\partial \theta_2} d\theta_2 \right) d\theta^M - \right. \\ & \left. - \Delta \hat{M}^N \frac{\partial q_{\text{тр}}}{\partial \tau} \left(\frac{\partial \tau}{\partial \theta_1} \frac{dM_1^K}{ds} \theta^K + \frac{\partial \tau}{\partial \theta_2} \frac{dM_2^K}{ds} \theta^K \right) ds - \right. \end{aligned}$$

$$-\Delta \dot{M}^N \left(\frac{\partial q_{\text{тр}}}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial p} dp + \frac{\partial q_{\text{тр}}}{\partial s} ds \right) \Big] dS. \quad (2.27)$$

Производные $q_{\text{тр}}$, $q_{\text{теп}}$ и $q_{\text{изл}}$ определяются следующими выражениями:

$$\frac{\partial q_{\text{изл}}}{\partial \theta_1} = 4F(\theta_1 - \theta^Z)^3, \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial q_{\text{изл}}}{\partial \theta_2} = 4F(\theta_2 - \theta^Z)^3, \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial \Delta \theta} = k(h, p, \bar{\theta}), \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial \bar{\theta}} = \frac{\partial k(h, p, \bar{\theta})}{\partial \bar{\theta}} \Delta \theta, \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial h} = \frac{\partial k(h, p, \bar{\theta})}{\partial h} \Delta \theta, \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial p} = \frac{\partial k(h, p, \bar{\theta})}{\partial p} \Delta \theta, \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial q_{\text{тр}}}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial p} = \eta \frac{|\Delta s|}{\Delta t} \mu, \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial q_{\text{тр}}}{\partial s} = \eta \frac{\tau}{\Delta t}. \quad (2.35)$$

Дополнительно предлагается рассмотреть явление заклинивания колеса с точки зрения его нагрева. Во время заклинивания колесной пары в месте контакта колеса с рельсом происходит интенсивное выделение тепла [33]. Температура достаточно быстро достигает уровня, при котором снижается прочность колесной стали и происходит быстрый износ её контактирующей с рельсом поверхности. При практически плоской головке рельса и глубине износа величина изношенной площадки определяется из выражения:

$$S = 2\delta_k \sqrt{h(2R - h)}, \quad (2.36)$$

где δ_k – ширина выбоины на поверхности катания.

Учитывая практически одинаковые теплофизические свойства колесной и рельсовой стали, можно принять допущение о том, что в колесо поступает поло-

вина образующегося при трении тепла ($\alpha_R = 0,5$) и определенная его часть отводится обратно в рельс под влиянием контакта нагретого колеса с холодным рельсом. Фактическая передача тепла от колеса в рельс происходит за счет теплопроводности. При этом в месте контакта устанавливается одинаковая температура колеса и рельса с более высоким градиентом в рельсе, а плотность возникающего теплового потока определится по формуле:

$$q_0 = \varphi \cdot P \cdot \vartheta \cdot A / 2 \cdot S, \quad (2.37)$$

где φ – коэффициент трения заклиненного колеса;

P – вертикальная нагрузка от подвижного состава, приходящаяся на рассматриваемое колесо;

ϑ – скорость движения вагона;

A – термический эквивалент работы ($A = 1$ в системе единиц СИ).

Расчет коэффициента конвективной теплопередачи. При движении колеса подвергается обтеканию воздушным потоком, который оказывает влияние на нагрев колеса. Для учета этого явления в состав модели также включается подмодель 1.3 для определения граничных условий для расчета в рамках метода конечных элементов (МКЭ) – коэффициента конвективной теплопередачи. В подмодели он определяется как функция [107], зависящая от скорости движения вагона и физических свойств воздуха при заданной температуре в каждый момент времени t :

$$h(t) = \frac{0,037k_a}{2r} \left(\frac{2\rho_a r \times \vartheta(t)}{\mu_{va}} \right)^{0,8} \left(\frac{C_{pa}\mu_{va}}{k_a} \right)^{0,33}, \quad (2.38)$$

где k_a , ρ_a , μ_{va} и C_{pa} – соответственно коэффициент теплопроводности, плотность, вязкость и удельная теплоемкость воздуха при заданной температуре;

r – радиус колеса.

Выходными данными первого блока моделирования являются зависимости плотности теплового потока и коэффициента конвективной теплопередачи от времени торможения, которые являются входными данными для моделирования нагрева колеса при торможении.

2.2.2 Моделирование нагрева колеса

Во втором блоке (рисунок 2.1) реализуется модель нагрева колеса при различных режимах торможения. Модель реализована на основе МКЭ. Плотности тепловых потоков, полученные в первом блоке имитационной модели, используются в качестве нагрузок для оценки распределения температурных полей в колесе и колодке. Рассмотрим второй блок модели более подробно.

Общая схема разработки и построения конечно-элементной модели для оценки нагрева колеса приведена на рисунке 2.2.

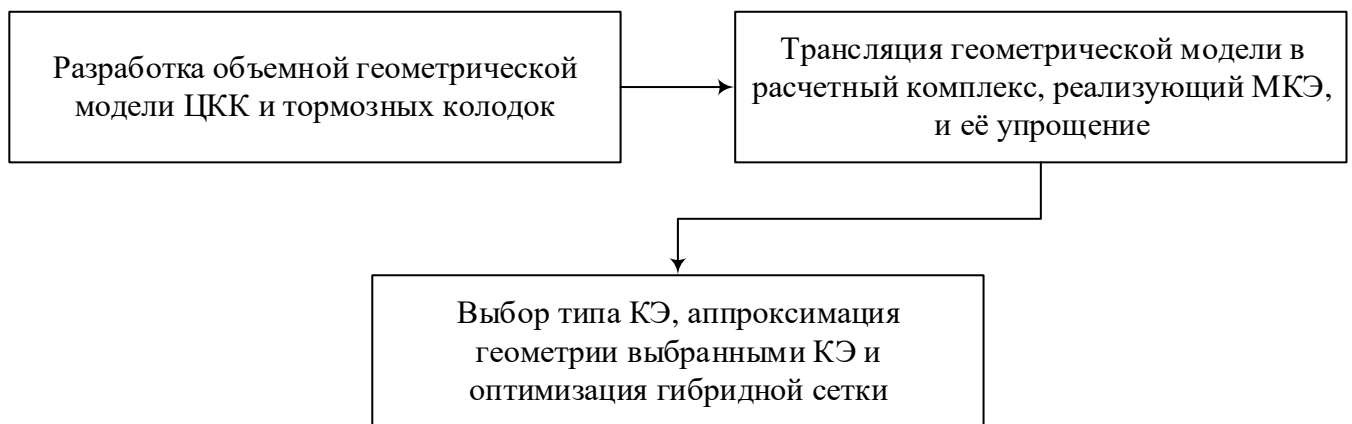
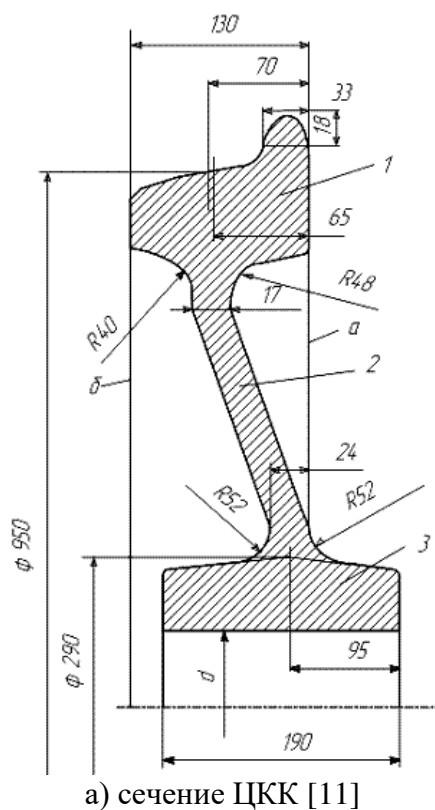


Рисунок 2.2 – Схема разработки и построения конечно-элементной модели для оценки нагрева колеса при колодочном торможении

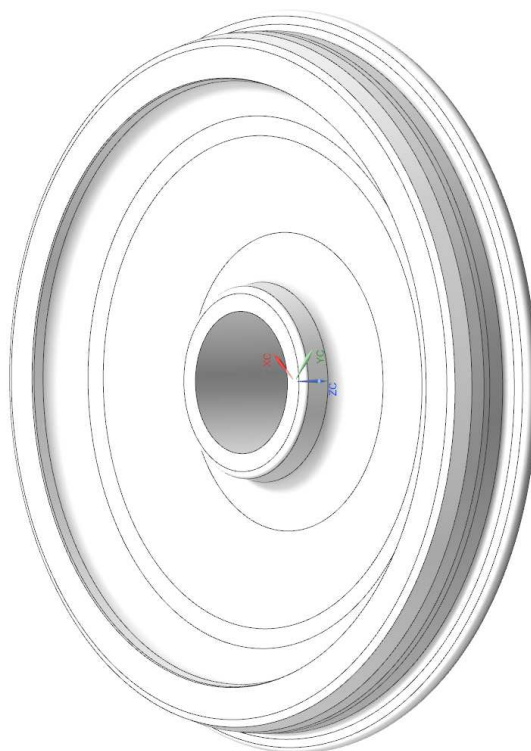
Таким образом, на первом этапе методом твердотельного моделирования разработаны объемные геометрические модели колеса и тормозных колодок. Колесо представлено в виде цельнокатаного колеса (далее ЦКК или колесо), соответствующего [11], с диаметром по кругу катания 950 мм (рисунок 2.3). На рисунке 2.3, б изображена модель, соответствующая неизношенному ЦКК с толщиной обода 70 мм. В дополнение к ней также разработаны две твердотельные модели:

а) изношенного колеса с толщиной обода 22 мм для исследования влияния износа колеса на его нагрев;

б) неизношенного колеса с плоской площадкой на поверхности катания площадью $\sim 300 \text{ мм}^2$, моделирующей пятно контакта колеса и рельса, для исследования нагрева колеса при его заклинивании. При исследованиях нагрева колеса при заклинивании тело рельса не моделируется, а отвод тепла в него учитывается опосредованно при помощи коэффициента теплоотдачи.



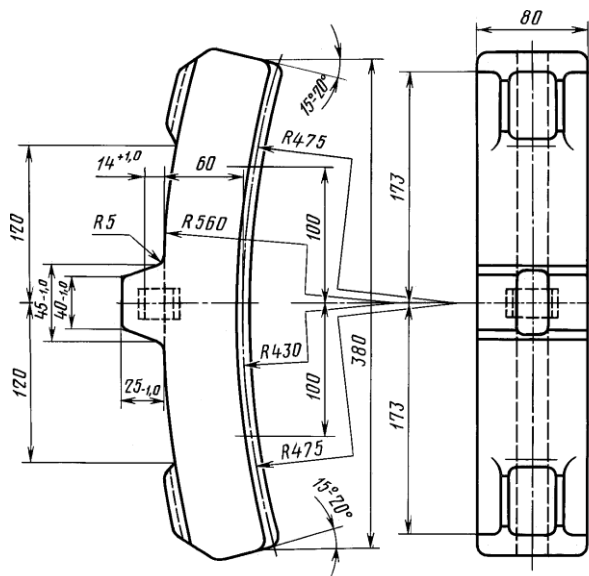
а) сечение ЦКК [11]



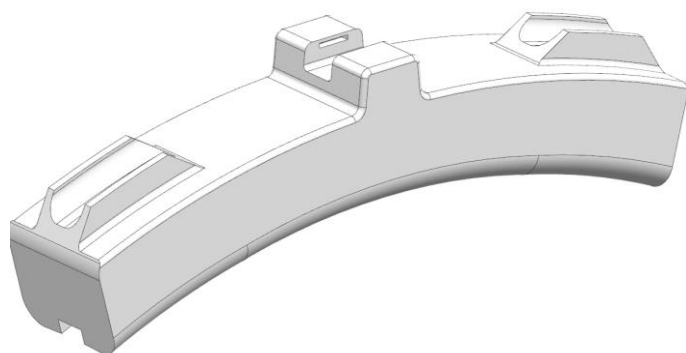
б) твердотельная модель ЦКК

Рисунок 2.3 – Сечение и твердотельная модель ЦКК

Для исследования влияния материала-наполнителя тормозной колодки на нагрев колеса разработаны твердотельные модели стандартной чугунной и композиционной колодок. Твердотельная модель чугунной колодки соответствует ТУ 32 ЦТВР-279-89 (рисунок 2.4).



а) эскиз чугунной тормозной колодки



б) твердотельная модель чугунной тормозной колодки

Рисунок 2.4 – Чугунная тормозная колодка

Твердотельная модель композиционной тормозной колодки соответствует конструкции колодки 25610-Н (рисунок 2.5).

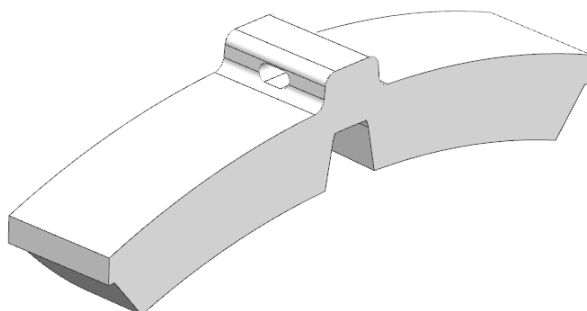


Рисунок 2.5 – Композиционная тормозная колодка

Для аппроксимации геометрии колеса и тормозных колодок использованы два типа конечных элементов (КЭ) – 8-узловой КЭ в виде гексаэдра и 4-узловой КЭ в виде тетраэдра (рисунок 2.6).

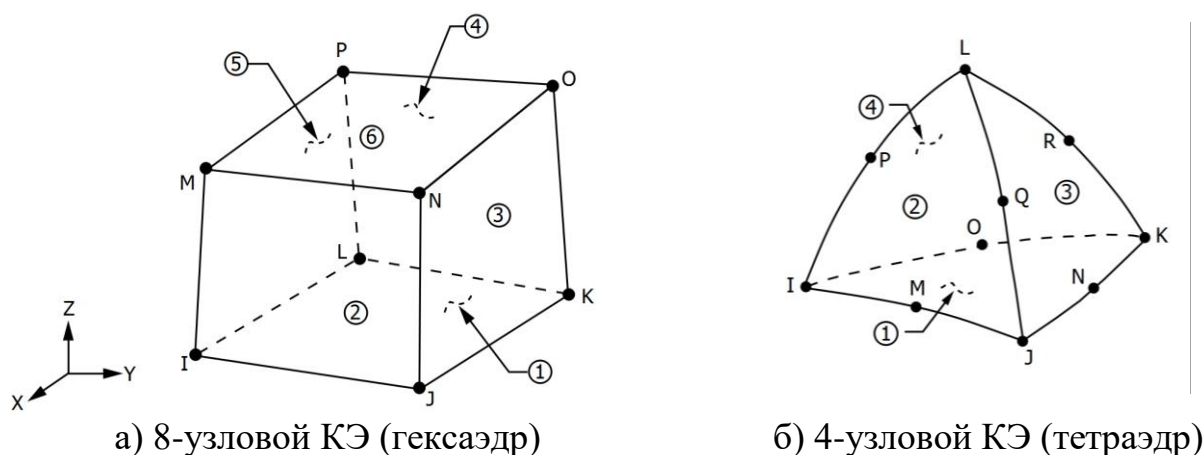
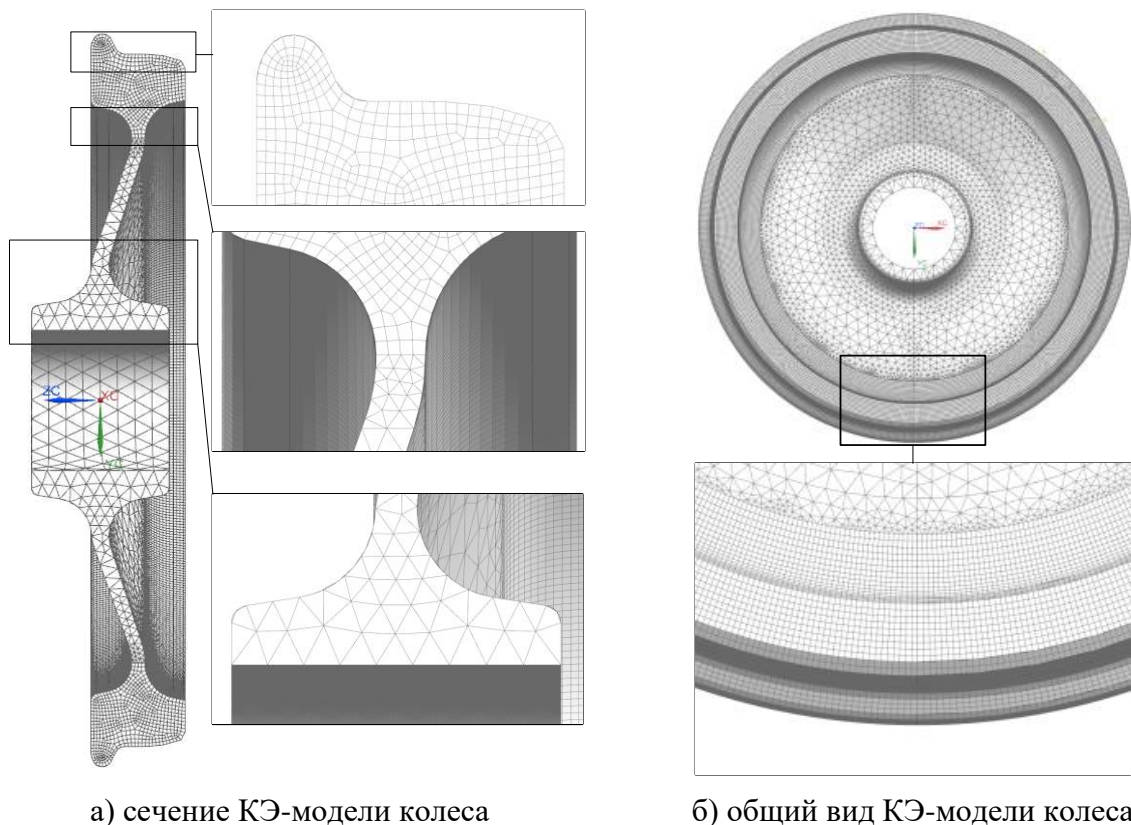


Рисунок 2.6 – Формы применяемых конечных элементов

Выбор указанных типов КЭ обусловлен следующими соображениями. Применение 8-узловых КЭ в виде гексаэдра вместо тетраэдральных КЭ позволяет значительно снизить размерность конечно-элементной модели при повышении точности получаемого решения. Одновременно с этим аппроксимация геометрии, в особенности, тел вращения (колесо), только КЭ гексаэдральной формы не является оптимальным подходом. В связи с особенностью алгоритмов конечно-элементных сеточных строителей размер гексаэдрального КЭ становится неоправданно малым

при приближении к центру тела вращения, что влечет за собой ненужное увеличение размерности модели. К тому же аппроксимация геометрии сложной формы гексаэдральными КЭ весьма трудоемка. Одновременно с этим КЭ в виде тетраэдра позволяет аппроксимировать геометрию сколь угодно сложной формы.

Основываясь на изложенных выше соображениях, разработаны гибридные конечно-элементные сетки, содержащие оба указанных КЭ. Конечно-элементная модель колеса представлена на рисунке 2.7.



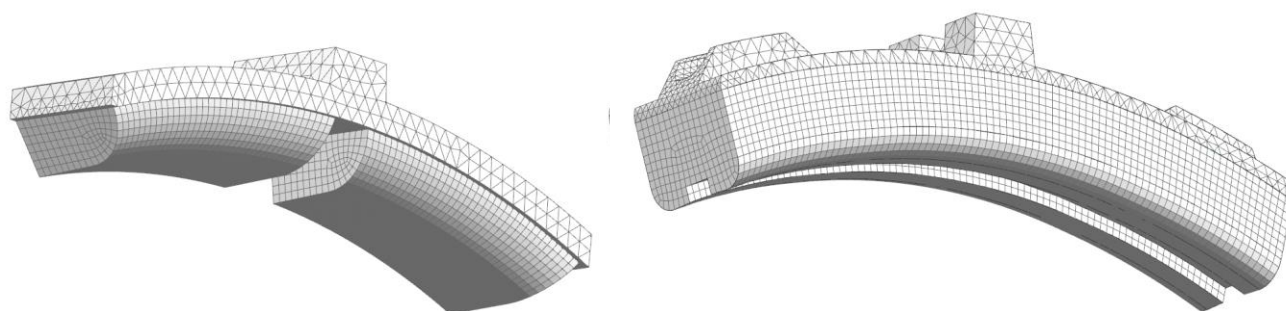
а) сечение КЭ-модели колеса

б) общий вид КЭ-модели колеса

Рисунок 2.7 – КЭ-модель для исследования нагрева колеса при взаимодействии с тормозной колодкой

Зона обода колеса аппроксимируется объемными КЭ гексаэдральной формы размером 5 мм с целью повышения точности получаемых результатов. Дисковая часть колеса и зона ступицы аппроксимируются тетраэдральными КЭ размером от 5 до 30 мм.

Общий вид конечно-элементных моделей тормозных колодок представлен на рисунок 2.8. Средний размер КЭ в моделях составляет порядка 5 мм.



а) КЭ-модель композиционной тормозной колодки

б) КЭ-модель чугунной тормозной колодки

Рисунок 2.8 – КЭ-модели тормозных колодок

В сводной таблице 2.4 приведены общие характеристики разработанных моделей.

Таблица 2.4 – Характеристики разработанных КЭ-моделей

КЭ-модель	Количество	
	элементов, шт.	узлов, шт.
колеса	488 834	455 701
чугунной тормозной колодки	28 960	34 023
композиционной тормозной колодки	25 627	35 889

Конечно-элементные модели колеса и тормозных колодок учитывают механические и теплофизические характеристики их материалов. В рамках модели принято допущение о постоянстве свойств материалов (вне зависимости от температуры тел) [30]. Общие сведения о свойствах материалов приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Механические и теплофизические свойства колёс, тормозных колодок [62], [12], [31]

Свойство	Элемент модели / материал		
	колесо	чугунная тормозная колодка	композиционная тормозная колодка
	колесная сталь	чугун	ТИИР-300
плотность, кг/м ³	7850	7200	2100
модуль Юнга, МПа	$2,1 \cdot 10^5$	$1,47 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^5$
коэффициент Пуассона	0,28	0,23	0,4
удельная теплоемкость, Дж/кг·К	486	540	430

Свойство	Элемент модели / материал		
	колесо	чугунная тормозная колодка	композиционная тормозная колодка
	колесная сталь	чугун	ТИИР-300
коэффициент теплопередачи, Вт/м·К	определяется по формуле (2.38)		
коэффициент линейного расширения, $10^{-6} \cdot \text{К}^{-1}$	11,6	10	30

В рамках модели задаются следующие граничные условия:

1. Тепловая связь между контактными поверхностями колёс и тормозных колодок с учетом коэффициента теплопроводности между ними. При этом основным параметром, характеризующим тепловую связь, является величина тепловой проводимости контакта [63]:

$$R_M = \frac{1}{2,12\lambda_M \left(\frac{p}{E} B_{\Pi} \right)^{0,8} g} \cdot 10^{-4}, \quad (2.39)$$

где λ_M – коэффициент теплопроводности материала;

p – контактное давление;

E – модуль упругости материала;

B_{Π} – коэффициент, характеризующий геометрические свойства поверхностей;

g – коэффициент, учитывающий разность между фактическими площадями контакта при начальном и последующем приложениях нагрузки.

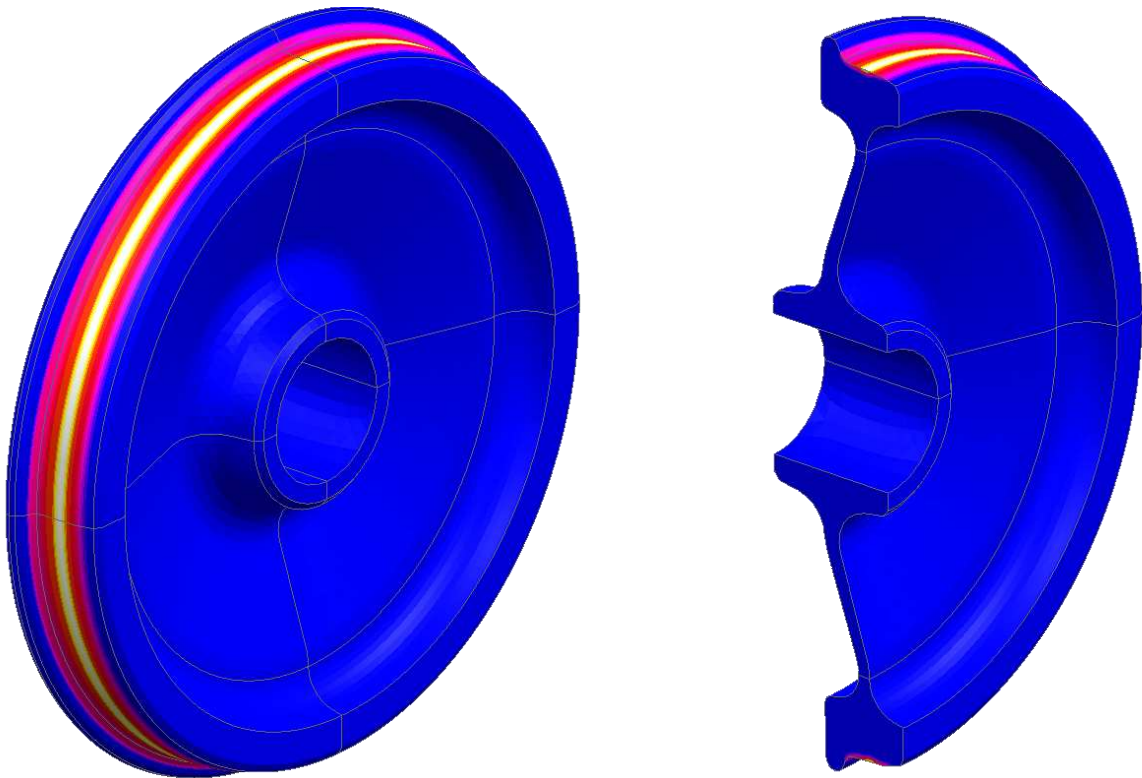
2. Тепловая нагрузка в виде теплового потока, источником которой приняты контактные поверхности тормозной колодки. Рассчитывается в подмодели 1.2.

3. Конвекция в среде с учетом коэффициента конвективной теплопередачи, рассчитываемого по зависимости (2.38). Рассчитывается в подмодели 1.3.

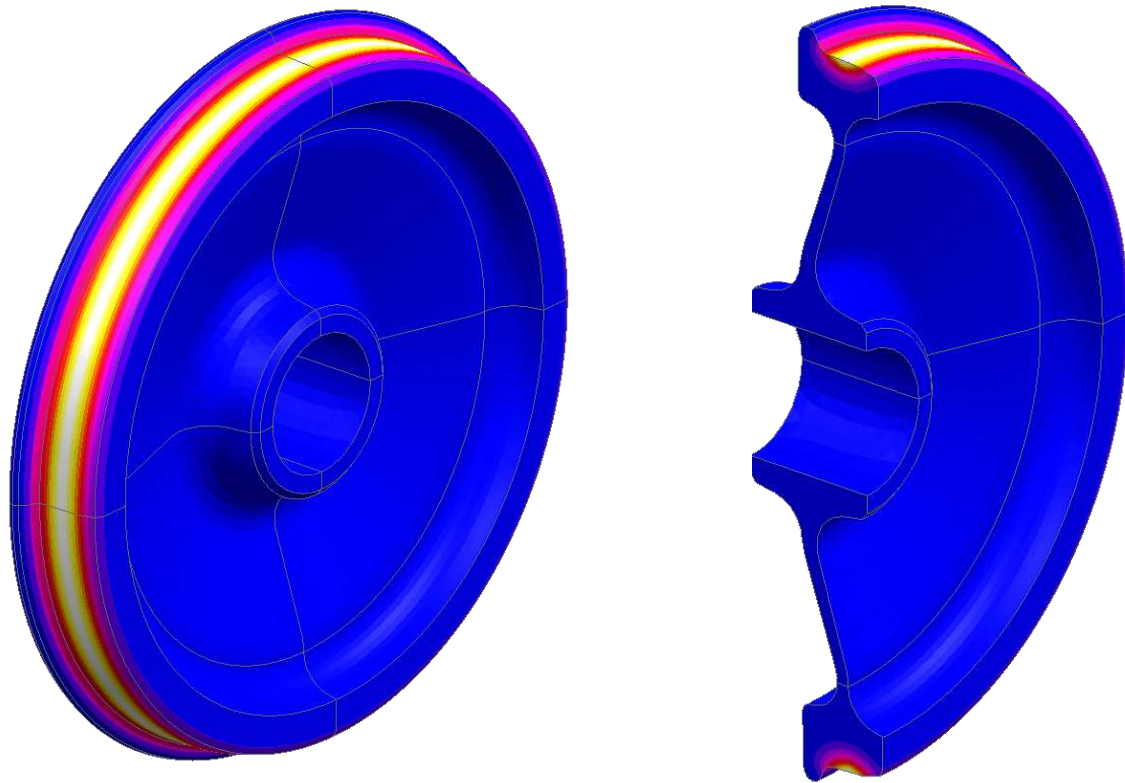
4. Специальный объект моделирования, обеспечивающий вращение элементов контактных поверхностей колеса вокруг его оси по задаваемому закону на основе предварительного тормозного расчета. Таким образом, устраняется допущение о неподвижности источника тепла относительно поверхности катания колеса, сле-

ланное в работах [33]. Следовательно, с использованием разработанной модели возможно более глубокое исследование теплового состояния колеса в начальные моменты времени торможения.

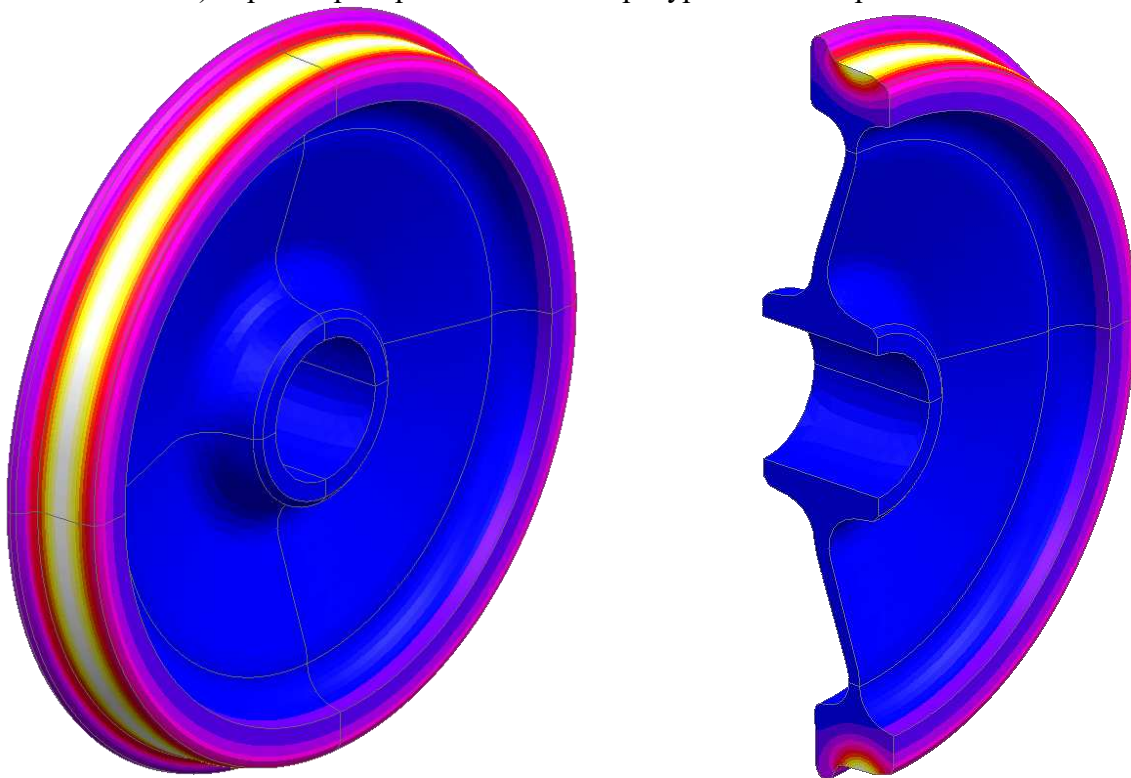
Результаты численного моделирования, проводимого с использованием вышеописанной модели, представляются в виде динамически изменяющихся картин процесса нестационарного нагрева колеса при взаимодействии с тормозной колодкой. В качестве примера на рисунках 2.9, 2.10 приведены полученные результаты по некоторым примечательным режимам торможения, которые будут рассмотрены в главе 3.



а) картина распределения температур в момент времени $t = 1$ с

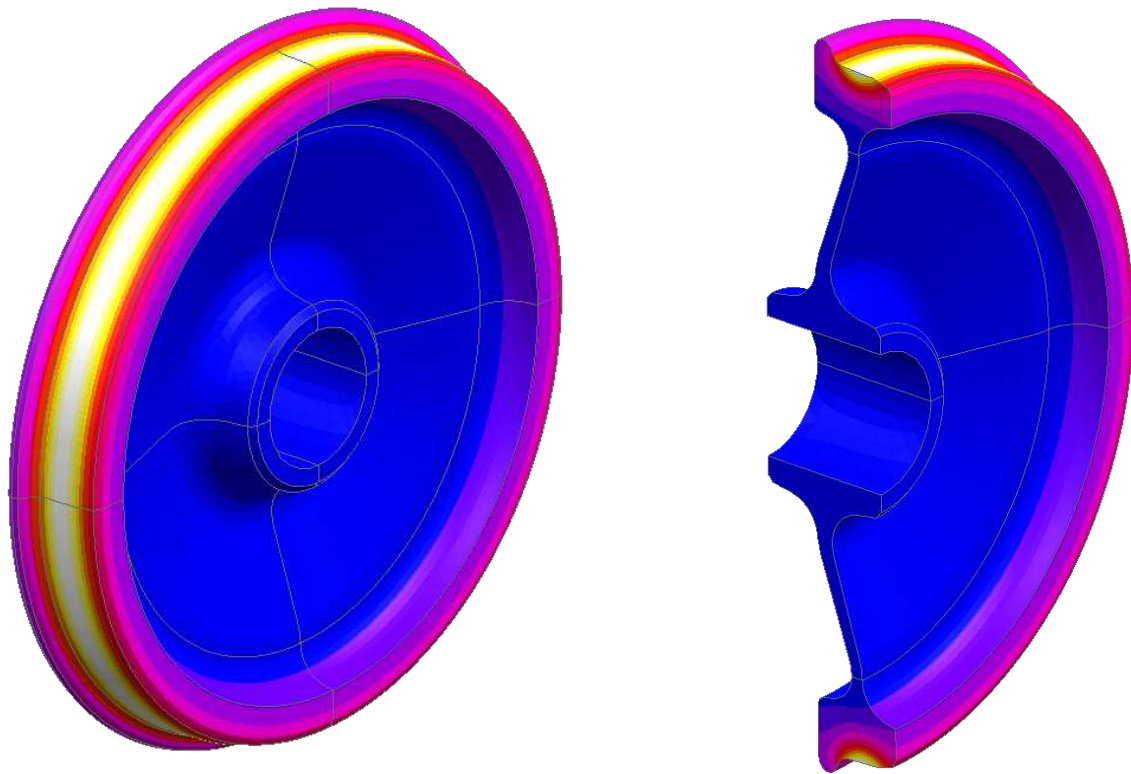


б) картина распределения температур в момент времени $t = 30$ с

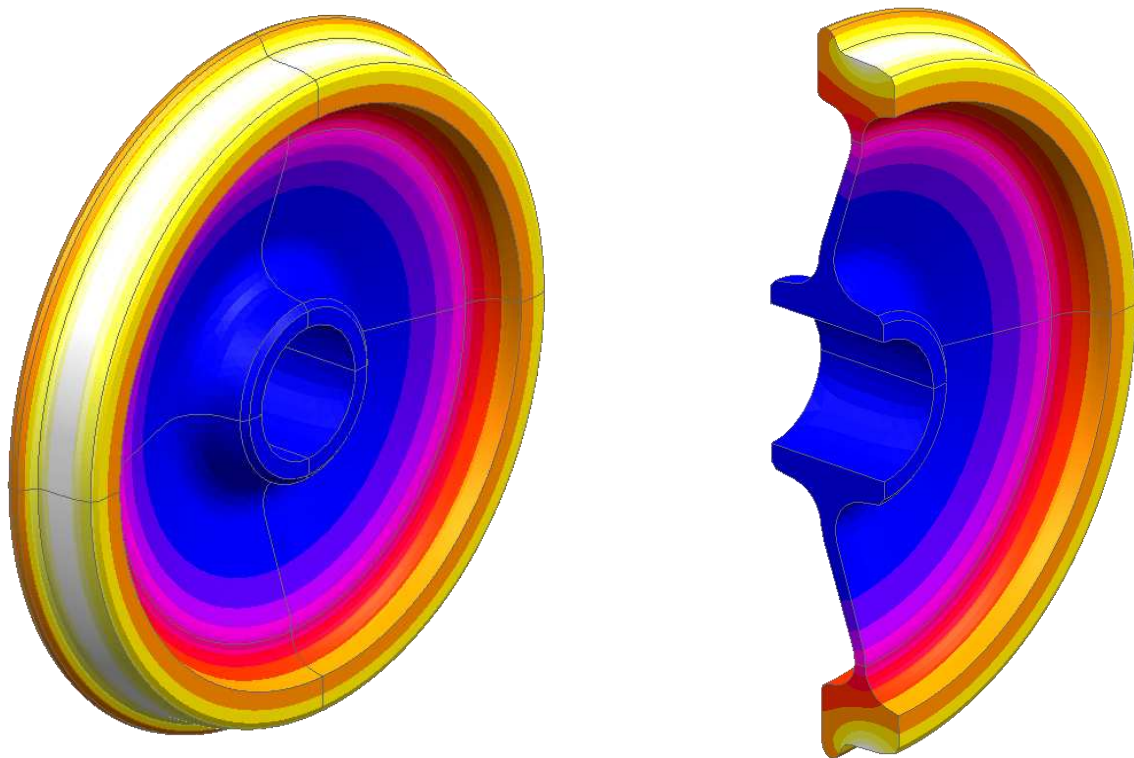


в) картина распределения температур в момент времени $t = 58$ с

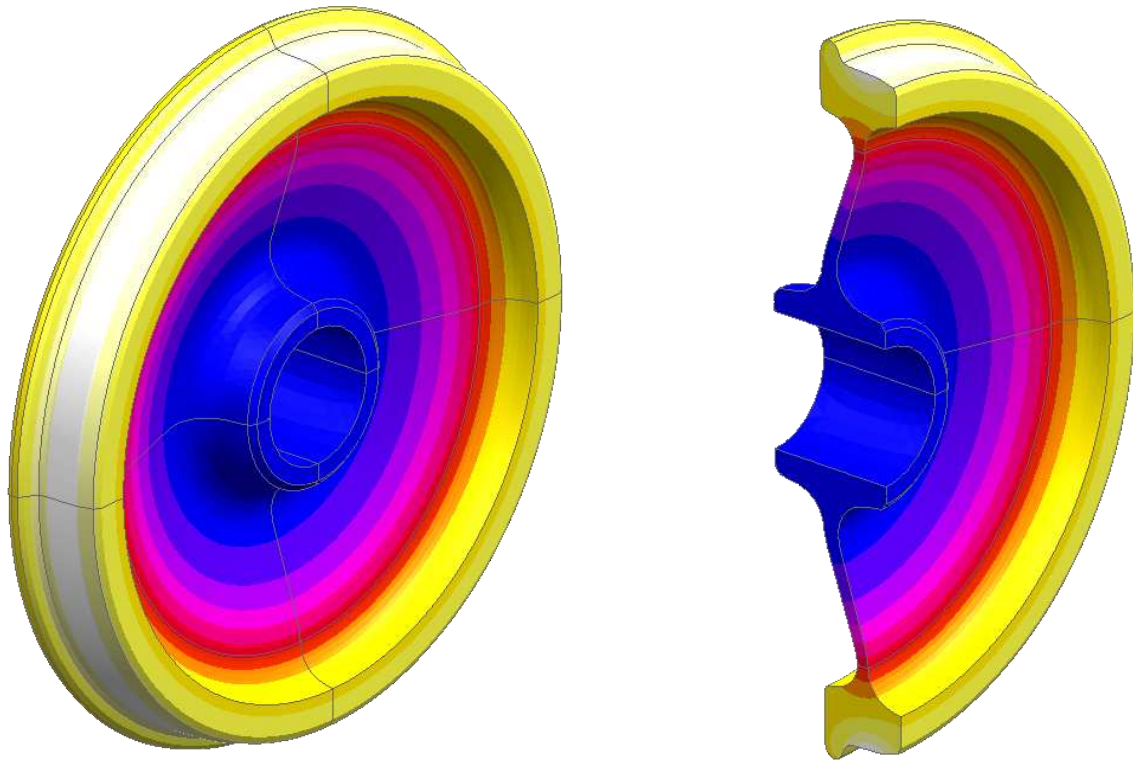
Рисунок 2.9 – Картина нестационарного процесса нагрева колеса при кратковременном торможении композиционной тормозной колодкой ($t = 58$ с)



а) картина распределения температур в момент времени $t = 100$ с



б) картина распределения температур в момент времени $t = 600$ с



в) картина распределения температур в момент времени $t = 1200$ с

Рисунок 2.10 – Картина нестационарного процесса нагрева колеса при длительном торможении композиционной тормозной колодкой ($t = 1200$ с)

Как видно из представленных рисунков, результаты, получаемые с помощью модели, позволяют получить наиболее полное представление о распределении температур в колесе в различных режимах торможения. При различных направлениях доработки модель может быть использована для:

- а) исследований нагрева колёс пассажирских вагонов и локомотивов;
- б) подбора различных вариантов материалов-наполнителей тормозных колодок (в т. ч. исследование взаимодействия колеса и металлокерамической тормозной колодки);
- в) исследований по применению термостойких сталей для изготовления колёс и т. д.

2.3 Компьютерная модель определения траектории сканирования при тепловом контроле колодочных тормозов и вычисления уровня сигнала, получаемого приемником ИК-излучения

Известна модель определения траектории зоны сканирования при диагностике и вычисления уровня сигнала ИК-излучения [88], входящая в состав комплексной диагностической модели бесконтактного теплового контроля нагрева буксовых узлов, впервые предложенная в работах [47], [46]. Во многом показанная далее модель [45; 59] опирается на теоретические положения и принципиальные решения упомянутой модели.

Исходными данными к моделированию траектории сканирования и вычисления уровня сигнала, получаемого приемником ИК-излучения, являются результаты моделирования нагрева колеса в рассмотренной выше модели. В модели определения траектории сканирования принято существенное допущение – вертикальные перемещения колеса, как объекта теплового контроля, вследствие движения по неровностям пути приняты несущественными и в рамках модели не учитываются. С учетом этого допущения форма траектории сканирования является достаточно простой и представляет собой с некоторой степенью упрощения параболу, начальная и конечная точки которой находятся на окружности колеса, а вершина лежит на оси мгновенного центра вращения колеса, соответствующего моменту начала пересечения колесом сканирующего луча приемника ИК-излучения, а высота её расположения на колесе зависит от угла ориентации приемника.

Более сложной является задача определения формы и площади участка колеса, попадающего в зону контроля приемника ИК-излучения (здесь и далее будем именовать этот участок «пятном», как было предложено автором [47]). Это связано с тем, что составные части колеса (обод, диск, ступица), а также соединение между ними, имеют сложные формы со скруглениями больших радиусов, плавными изгибами, конусными переходами. Для отыскания формы и площади пятна в каждый момент времени сканирования необходимо решать задачу динамического пространственного пересечения поверхности колеса с зоной контроля, имеющей вид

конуса с вершиной в точке, из которой исходит оптическая ось приемника. В этой связи, а также с целью точного описания траектории сканирования колеса приемником ИК-излучения и определения формы и площади пятна в каждый момент времени сканирования разработана математическая модель движения колёсной пары по железнодорожному пути.

Предложенная модель базируется на применении методов исследования динамики систем твердых тел [61], в основе которых лежит применение следствий из второго закона Ньютона:

а) теоремы о движении центра масс:

$$Ma_C = \sum F_k^e = R^e, \quad (2.40)$$

где M – масса тела;

a_C – ускорение в базовой системе координат;

F_k^e – равнодействующая внешних сил;

б) теоремы об изменении кинетического момента тела:

$$I_C^1 \varepsilon^1 + \tilde{\omega} I_C^1 \omega^{(1)} = M_C^{e1}. \quad (2.41)$$

где I_C^1 – тензор инерции тела относительно центра масс;

ε^1 – угловое ускорение тела;

$\tilde{\omega}$ – кососимметрический тензор угловой скорости;

$\omega^{(1)}$ – угловая скорость тела;

M_C^{e1} – главный момент внешних сил относительно центра масс.

Рассматривая механическую систему из абсолютно твердых тел, соединенных шарнирами нормального типа, для каждого тела теорема о движении центра масс (2.40) и уравнение Эйлера (2.41) запишется в виде:

$$\begin{aligned} m_i a_i &= F_i + T_i, \\ I_i^i \varepsilon_i^i + \tilde{\omega} I_i^i \omega_i^i &= L_i^i + S_i^i, \\ i &= 1 \dots N, \end{aligned} \quad (2.42)$$

где i – номер тела;

N – число тел в системе;

F_i, L_i – главный вектор и главный момент относительно центра масс активных сил;

T_i, S_i – главный вектор и главный момент относительно центра масс сил реакций и связей.

Систему уравнений (2.42) можно переписать в матричном виде:

$$M_i W_i + K_i = G_i + R_i, \quad (2.43)$$

где $M_i = \begin{pmatrix} m_i E & 0 \\ 0 & I_i \end{pmatrix}$ – матрица масс отдельного тела;

$W_i = \begin{pmatrix} a_i \\ \varepsilon_i \end{pmatrix}$ – столбец активных сил;

$G_i = \begin{pmatrix} F_i \\ L_i \end{pmatrix}$ – столбец активных сил;

$R_i = \begin{pmatrix} T_i \\ S_i \end{pmatrix}$ – столбец реакций сил.

Зависимости кинематических характеристик всех тел системы от обобщенных координат и их первых и вторых производных по времени имеют вид:

$$\begin{aligned} \underline{r}_i^{(0)} &= \underline{r}_i^{(0)}(\underline{q}, t), & \underline{A}_{i0} &= \underline{A}_{i0}(\underline{q}, t), \\ \underline{v}_i^{(0)} &= \underline{D}_i^{(0)} \dot{\underline{q}} + \underline{v}_i^{\prime(0)}, & \underline{\omega}_i^{(0)} &= \underline{B}_i^{(0)} \dot{\underline{q}} + \underline{\omega}_i^{\prime(0)}, \\ \underline{a}_i^{(0)} &= \underline{D}_i^{(0)} \ddot{\underline{q}} + \underline{a}_i^{\prime(0)}, & \underline{\varepsilon}_i^{(0)} &= \underline{B}_i^{(0)} \ddot{\underline{q}} + \underline{\varepsilon}_i^{\prime(0)}, \end{aligned} \quad (2.44)$$

где i – номер произвольного тела системы;

$\underline{r}_i^{(0)}$ – радиус-вектор начала связанной с телом системы координат;

$\underline{v}_i^{(0)}, \underline{\omega}_i^{(0)}, \underline{a}_i^{(0)}, \underline{\varepsilon}_i^{(0)}$ – линейный и угловые скорости и ускорения тела относительно базовой системы координат.

Присоединяя соотношения (2.44) к уравнениям (2.42),

$$W_i = \Phi_i \ddot{\underline{q}} + W_i^*, \quad (2.45)$$

получим полные уравнения движения системы:

$$M_i \Phi_i \ddot{q} + M_i W_i^* + K_i = G_i + R_i, \quad (2.46)$$

которые представляют собой систему $6N$ линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных вторых производных от обобщенных координат \ddot{q} и сил реакций связи.

Разработанная динамическая модель представлена твердотельными моделями колеса и пути. Её общий вид приведен на рисунке 2.11.

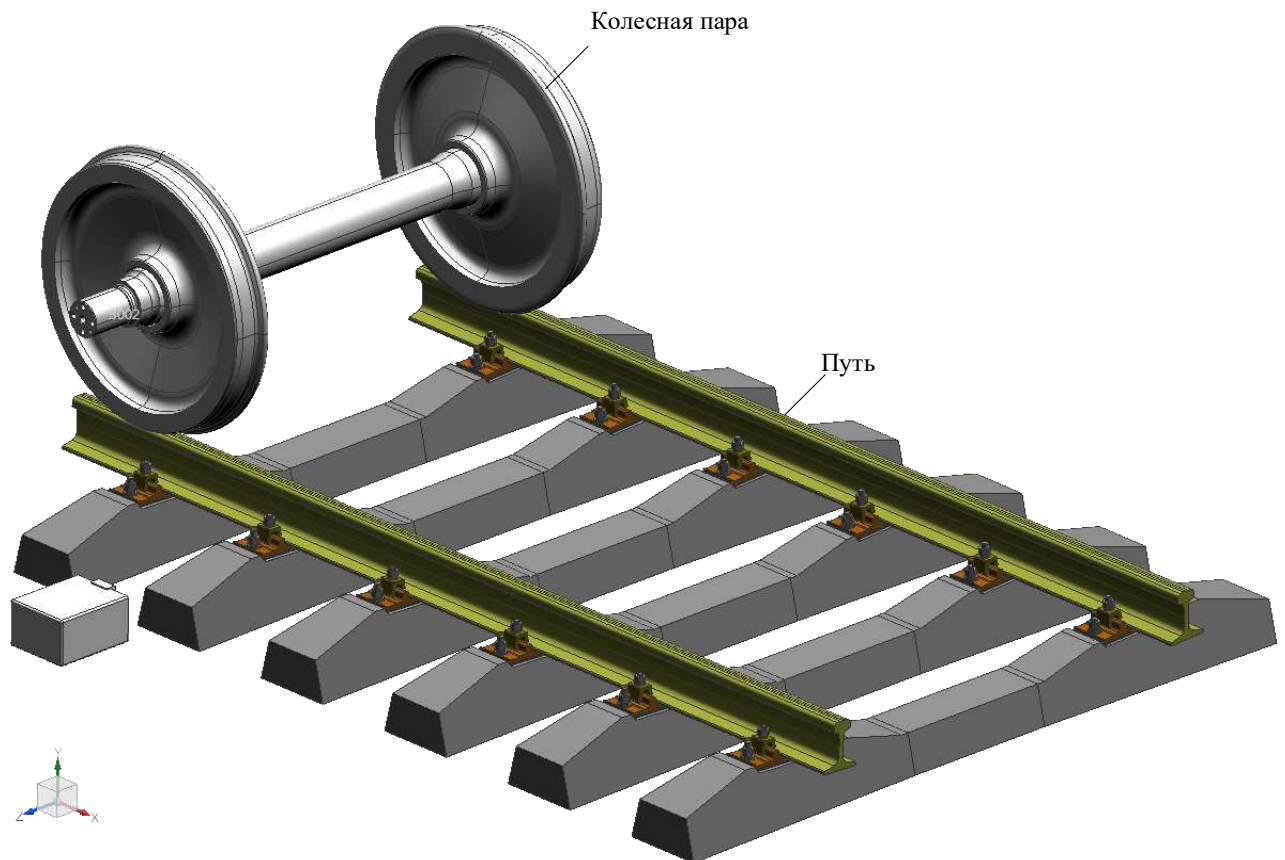


Рисунок 2.11 – Общий вид динамической модели движения колёсной пары по железнодорожному пути

Модель рельса принимается в качестве безмассового элемента со следующими допущениями:

- деформации левого и правого рельса не зависят друг от друга;
- при вертикальной деформации и поперечном отжатии рельса возникают линейные упруго-диссипативные силы.

Силы, действующие на рельс вследствие деформаций, определяются линейными соотношениями:

$$\begin{aligned} R_y &= -c_{ry}\Delta y_r - d_{ry}\Delta \dot{y}_r, \\ R_z &= -c_{rz}\Delta z_r - d_{rz}\Delta \dot{z}_r, \end{aligned} \quad (2.47)$$

где c_{ry} , c_{rz} , d_{ry} , d_{rz} – коэффициенты жесткости и демпфирования рельса в поперечном и вертикальном направлениях соответственно.

Силы R_y , R_z совместно с контактными силами, действующими между колесом и рельсом, образуют уравновешенную систему сил. В модели контакт полагается одноточечным (рисунок 2.12).

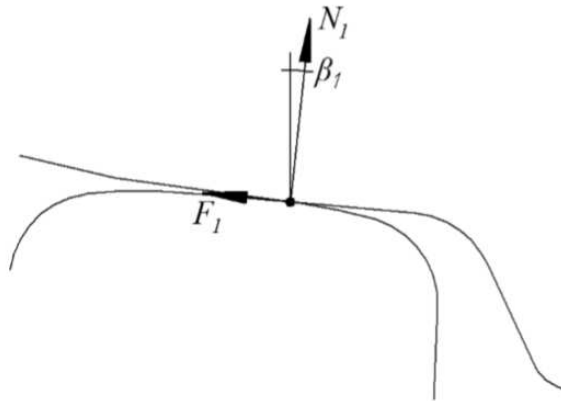


Рисунок 2.12 – Силы, действующие на колесо при одноточечном контакте

В этом случае уравнения равновесия в проекциях на оси пути имеют вид:

$$\begin{aligned} R_y - F_1 \cos \beta_1 + N_1 \sin \beta_1 &= 0, \\ R_z - N_1 \cos \beta_1 + F_1 \sin \beta_1 &= 0. \end{aligned} \quad (2.48)$$

В рамках модели предлагается рассматривать только качение колёсной пары по рельсам без учета остальной конструкции единицы подвижного состава. Тогда модель колёсной пары можно с достаточной для заявленных целей моделирования точностью представить единым телом.

В качестве примера процесс сканирования проиллюстрируем рисунком 2.13, *a*, на котором он представлен в трех фрагментах вращательно-поступательного движения колеса с шагом по оборотам колеса, показывающим прохождение характерных точек сканирующим лучом – точки начала сканирования (НС), оси колеса

и точки окончания сканирования (ОС). Приемник ИК-излучения ориентирован на ступицу колеса.

На рисунке 2.13, б укрупненно представлены полученные в результате моделирования формы пятна сигнала приемника для нескольких характерных моментов пересечения элементов конструкции колеса со сложной формой и сканирующего луча.

Для оценки формы и уровня сигнала, получаемого приемником ИК-излучения при сканировании колеса, на каждом шаге моделирования рассчитывается средняя температура пятна по формуле:

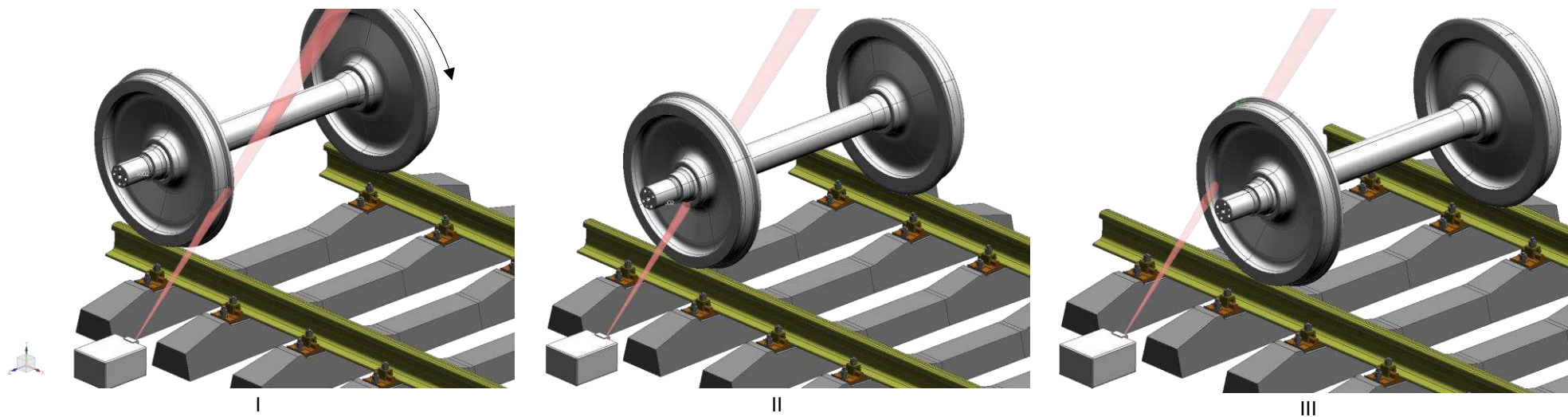
$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (2.49)$$

где T_i – температура i -го узла КЭМ, попавшего в зону контроля;

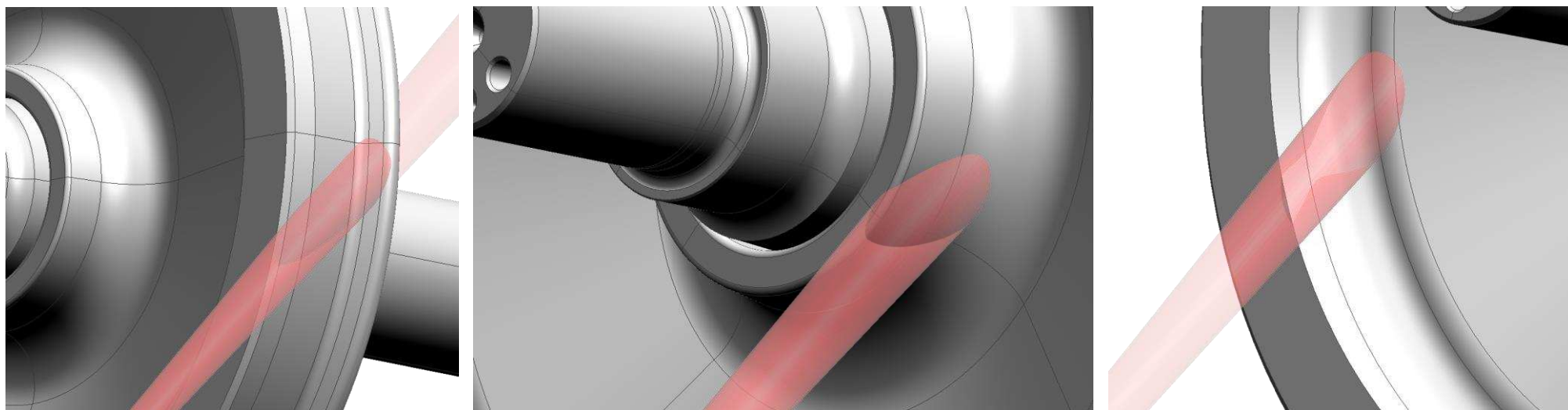
n – количество узлов, попавших в зону контроля.

Значение осциллограммы сигнала, пропорционального температуре участка колеса в зоне контроля, определяется из рассчитанных средних температур в каждый момент времени.

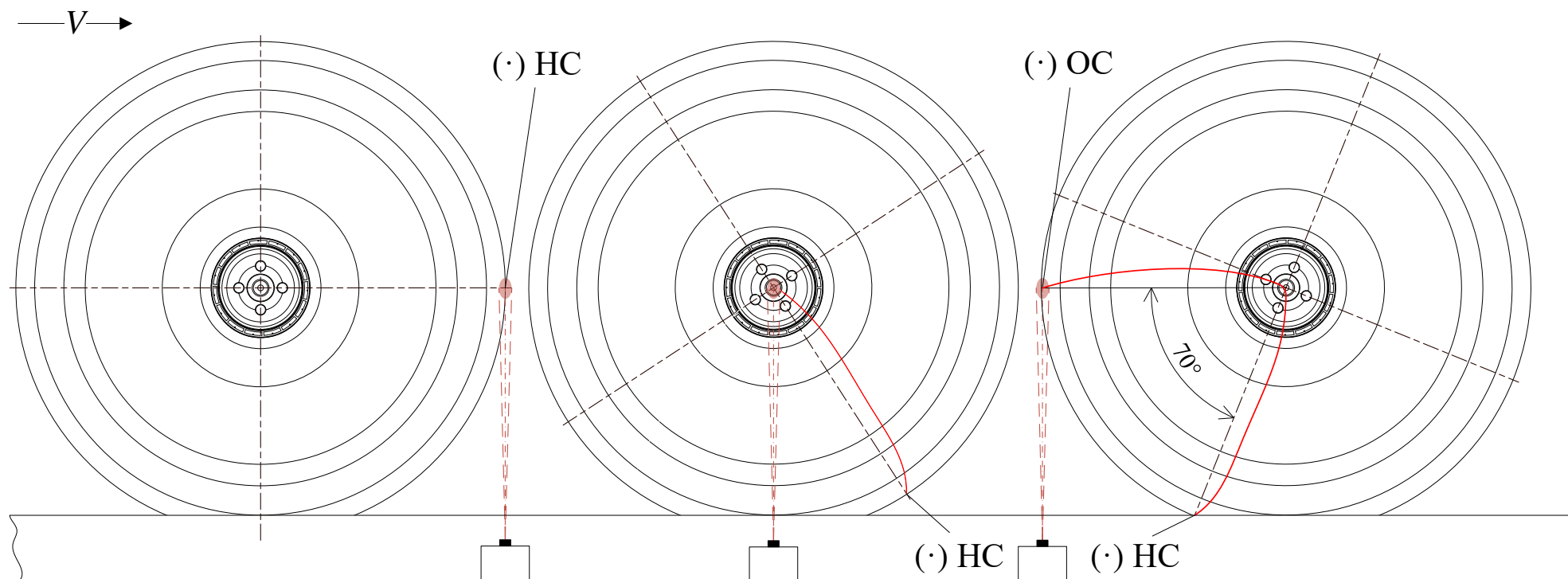
Результаты моделирования нагрева колеса с использованием модели, описанной в п. 1, передаются в модель определения траектории сканирования и вычисления уровня сигнала, где моделируется прохождение нагретого колеса и считывание температуры с его поверхности при сканировании. Общий вид реализованной модели с иллюстрацией процесса сканирования нагретого колеса представлен на рисунке 2.13, г.



а) процесс сканирования

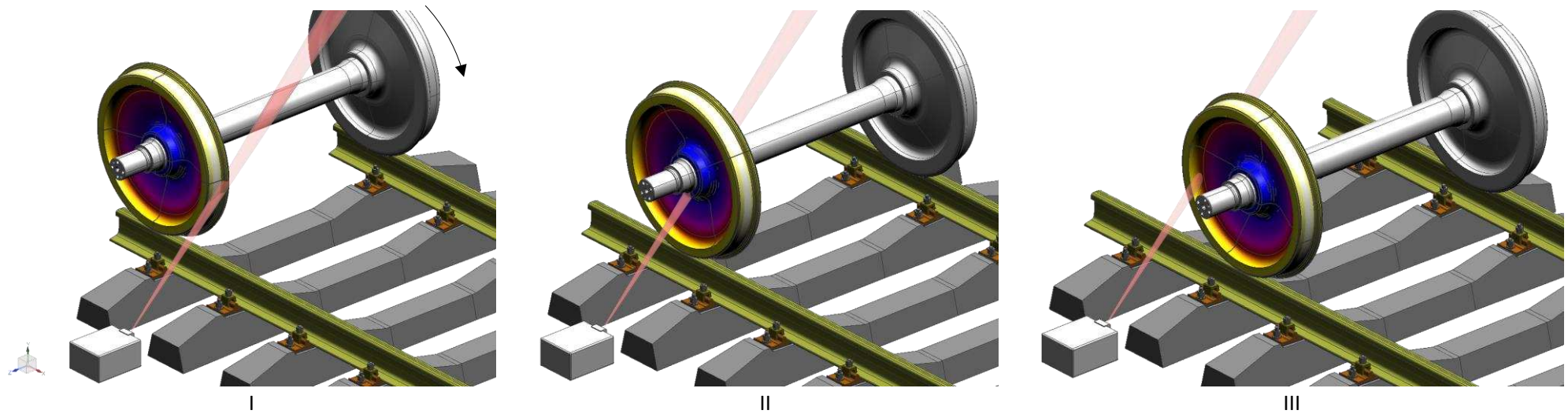


б) формы пятен в различные моменты моделирования прохождения колесной пары сканирующего луча



— Траектория сканирования

в) траектория сканирования



г) процесс сканирования нагретого колеса

Рисунок 2.13 – Сканирование колеса при ориентации приемника ИК-излучения на ступицу колеса

2.4 Выводы по главе 2

1 Разработана компьютерная реализация комплексной диагностической модели бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов в виде связанных блоков на основе методов имитационного моделирования.

2 В рамках комплексной модели бесконтактного теплового контроля разработана компьютерная модель нагрева колеса грузового вагона на основе метода конечных элементов, отличительными особенностями которой являются:

- разработанные детализированные конечно-элементные модели колеса, стандартной чугуновой и композиционной тормозных колодок;
- учет геометрии тела, физико-механических свойств материала-наполнителя тормозной колодки и вращательного движения колеса при осуществлении процесса торможения, что снимает принятое в других работах допущение о подводе тепловой нагрузки к колесу по всей площади обода;
- возможность получения полноразмерных картин температурных распределений в колесе и тормозной колодке при реализации различных режимов торможения и заклинивания колеса, что является критически важным при моделировании процесса бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов.

3 На основе применения методов аналитической геометрии и механики движения систем связанных тел разработана компьютерная модель определения траектории сканирования и вычисления уровня сигнала, получаемого приемником инфракрасного излучения, при осуществлении теплового контроля колодочных тормозов. Отличительной особенностью модели является возможность задания в качестве исходных данных температурного распределения, получаемого при помощи модели нагрева, и автоматизации процесса моделирования теплового контроля. Модель может быть использована для оценки формы и уровня сигнала при различных вариантах ориентации инфракрасной оптики на объект контроля.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В рамках настоящей главы рассмотрим применение разработанной имитационной модели теплового контроля колодочных тормозов для оценки нагрева колеса при взаимодействии с чугуновой и композиционной тормозными колодками, оценим влияние скорости начала торможения вагона, уклона пути, температуры окружающей среды, износа колеса, режима воздухораспределителя, материала-наполнителя колодки и продолжительности торможения на процесс нагрева, рассмотрим режимы нагрева колеса при заклинивании.

С целью накопления статистики для последующей разработки диагностического обеспечения СТК колодочных тормозов будем рассматривать не только максимальные температуры, до которых нагревается поверхность катания колеса, но также и ряд других точек, для которых возможна реализация бесконтактного теплового контроля. Схема размещения 10 точек, для которых будет проводиться температурный анализ, приведена на рисунке 3.1.

Рассмотрим и проведем анализ различных вариантов ориентации ИК-оптики СТК на объект контроля и оценим её влияние на форму и уровень сигнала, получаемого приемником ИК-излучения.

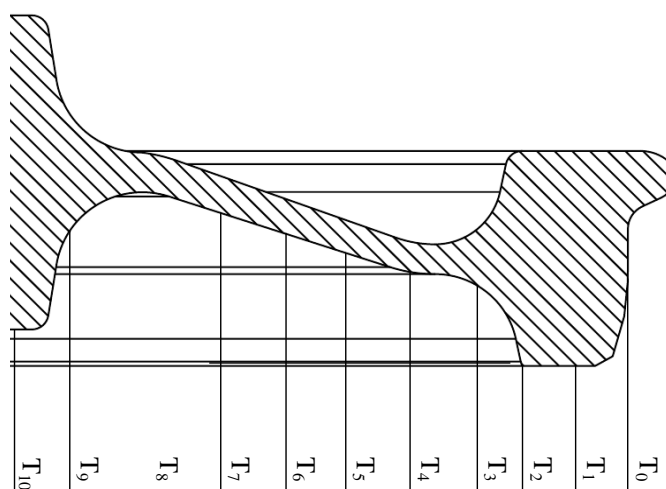


Рисунок 3.1 – Схема размещения точек для проведения температурного анализа

3.1 Компьютерное моделирование нагрева колеса при колодочном торможении

Для оценки нагрева колеса при взаимодействии с тормозной колодкой согласно разработанной методике проведены расчеты по 85 режимам, для каждого из которых получены динамические картины изменения распределения температур в колесе. Сводная таблица 3.1, содержащая основную информацию о рассмотренных режимах, приведена ниже.

Таблица 3.1 – Основные характеристики режимов нагрева колеса при торможении

№	Начальная скорость торможения, км/ч	Режим ВР*	Уклон, ‰	Температура воздуха, °С	Толщина обода колеса, мм		
Группа режимов I. Влияние начальной скорости (чугунная колодка)							
1	100	П	0	0	70		
2		С					
3		Г					
4	90	П					
5		С					
6		Г					
7	80	П					
8		С					
9		Г					
10	70	П					
11		С					
12		Г					
13	60	П					
14		С					
15		Г					
16	50	П					
17		С					
18		Г					
Группа режимов II. Влияние уклона (чугунная колодка)							
19	100	П	2	0	70		
20		С					
21		Г					
22	100	П	6				
23		С					
24		Г					
25	100	П	12				
26		С					
27		Г					
28	100	П	20				
29		С					
30		Г					
Группа режимов III. Влияние температуры окружающей среды (чугунная колодка)							

№	Начальная скорость торможения, км/ч	Режим ВР*	Уклон, ‰	Температура воздуха, °С	Толщина обода колеса, мм			
31	100	П	0	– 50	70			
32		С						
33		Г						
34	100	П		+ 50				
35		С						
36		Г						
Группа режимов IV. Влияние износа колеса (чугунная колодка)								
37	100	П	0	0	22			
38		С						
39		Г						
40	90	П						
41		С						
42		Г						
43	80	П						
44		С						
45		Г						
46	70	П						
47		С						
48		Г						
49	60	П						
50		С						
51		Г						
52	50	П						
53		С						
54		Г						
Группа режимов V. Влияние материала-наполнителя колодки (композиционная колодка)								
55	100	П				0	0	70
56		С						
57		Г						
58	90	П						
59		С						
60		Г						
61	80	П						
62		С						
63		Г						
64	70	П						
65		С						
66		Г						
67	60	П						
68		С						
69		Г						
70	50	П						
71		С						
72		Г						
Группа режимов VI. Влияние продолжительности торможения (композиционная колодка)*								
73	40	П	0	0	70			
74		С						

№	Начальная скорость торможения, км/ч	Режим ВР*	Уклон, ‰	Температура воздуха, °С	Толщина обода колеса, мм			
75	30	Г						
76		П						
77		С						
78		Г						
79	20	П						
80		С						
81		Г						
82	10	П						
83		С						
84		Г						
Группа режимов VII. Нагрев заклиненного колеса*								
85	3,6	–				0	0	70

* – скорость для данной группы режимов принимается постоянной в течение всего торможения

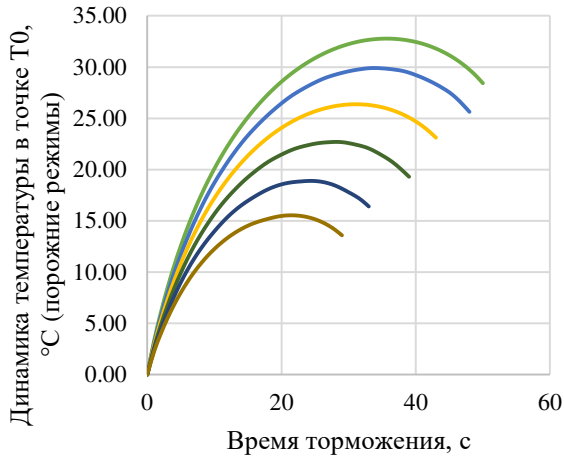
Как видно из таблицы 3.1, все режимы разделены на 7 групп по признаку характерного фактора, оказывающего влияние на нагрев колеса: начальная скорость движения вагона, уклон пути, температура окружающей среды, износ колеса, режим воздухораспределителя.

Для сравнительной оценки влияния материала-наполнителя колодки на нагрев колеса подобраны такие режимы, при которых время торможения и тормозной путь примерно одинаковы как при использовании чугуновых, так и композиционных колодок. Аналогичность этих режимов достигается за счет принятия различных тормозных коэффициентов при расчете исходных данных к тепловому расчету.

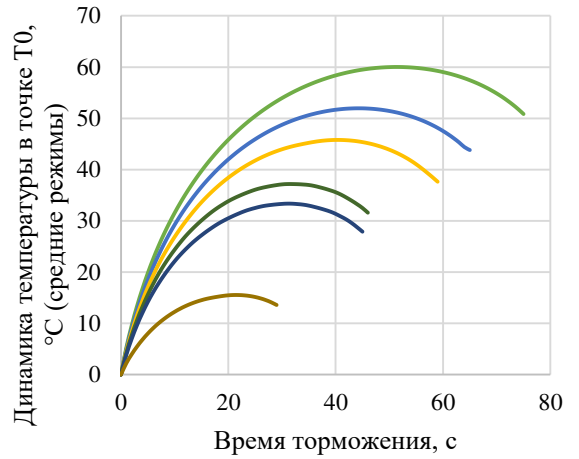
3.1.1 Влияние начальной скорости движения вагона

Влияние начальной скорости движения вагона на нагрев колеса оценим на режимах 1 – 18 (здесь и далее по тексту в части, касающейся режимов торможения, см. таблицу 3.1). Исследование проводится при скоростях 50...100 км/ч с шагом 10 км/ч, на площадке (уклон $i = 0\text{‰}$) при различных режимах воздухораспределителя на неизношенном колесе и температуре воздуха 0°С.

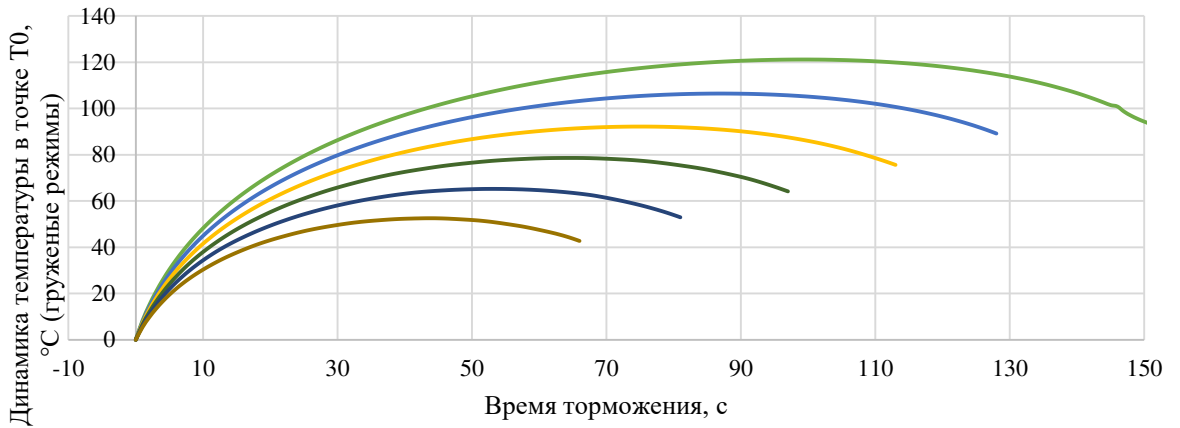
Результаты расчета по данным режимам приведены на рисунке 3.2 в виде графиков изменения температур в исследуемых точках на протяжении времени торможения поезда.



— 1 — 4 — 7 — 10 — 13 — 16

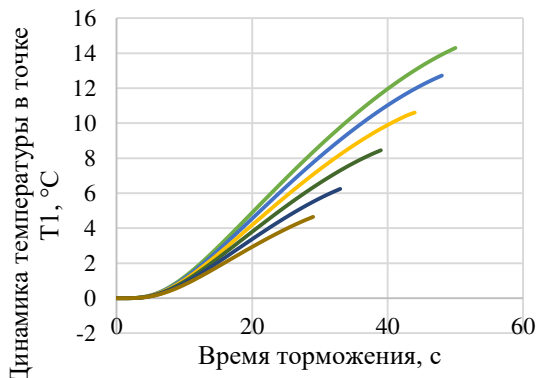


— 2 — 5 — 8 — 11 — 14 — 17

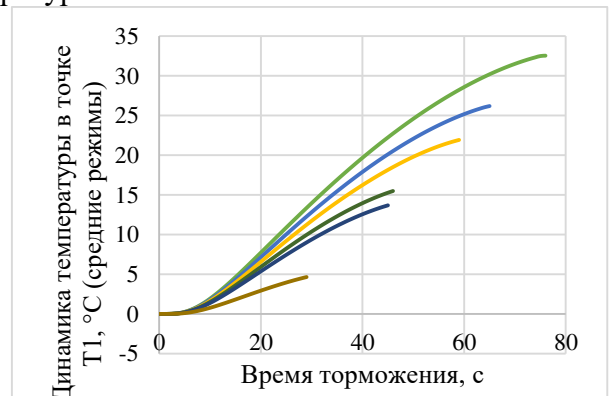


— 3 — 6 — 9 — 12 — 15 — 18

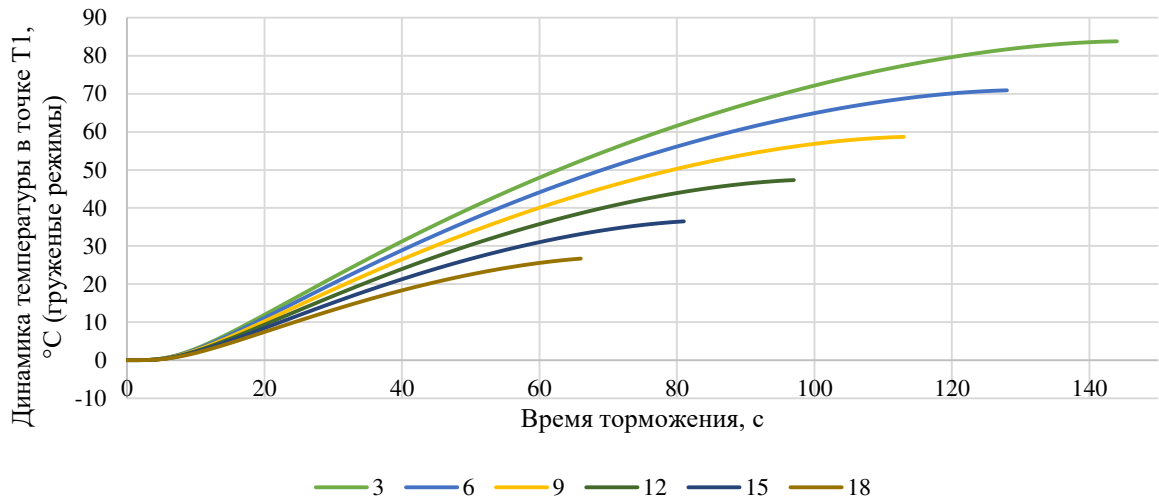
а) динамика температуры в точке T0



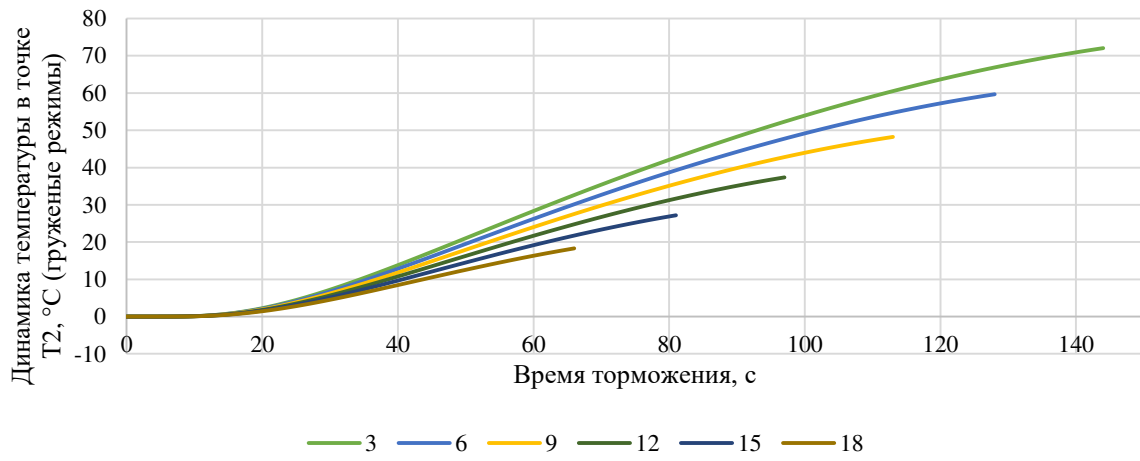
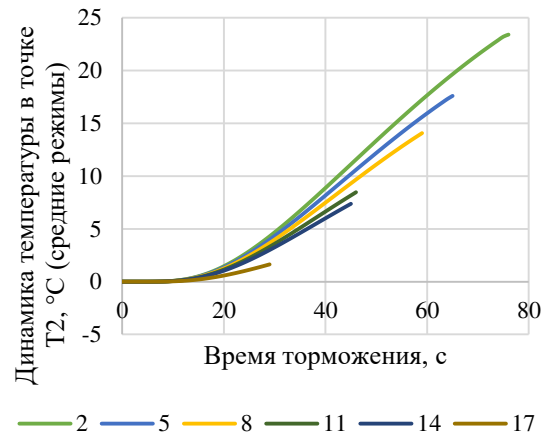
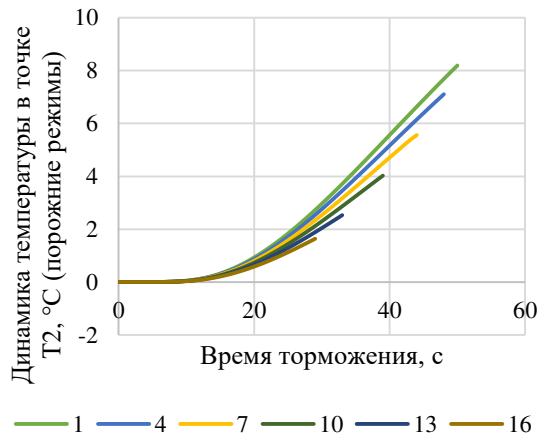
— 1 — 4 — 7 — 10 — 13 — 16



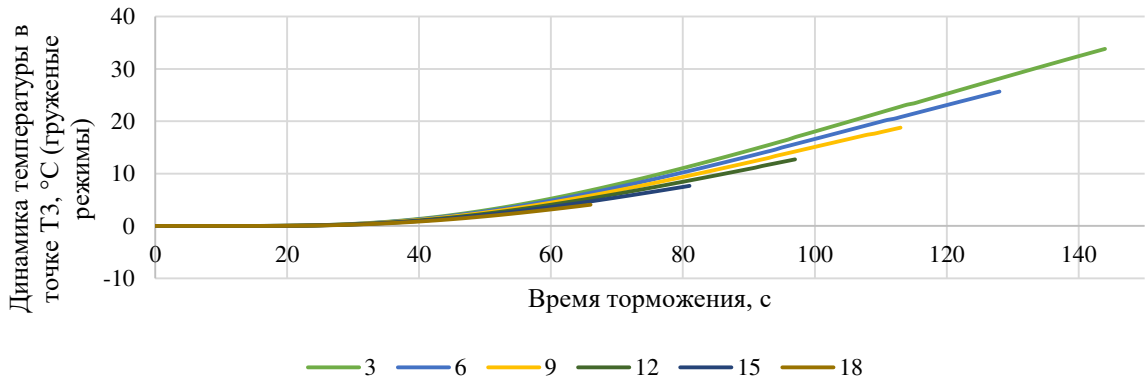
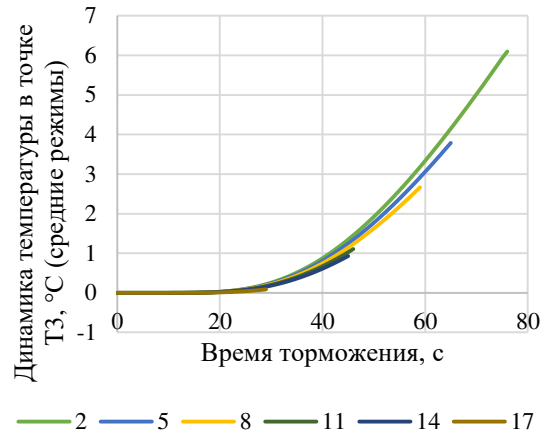
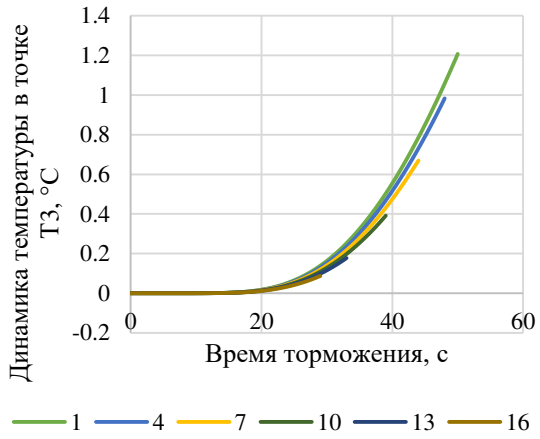
— 2 — 5 — 8 — 11 — 14 — 17



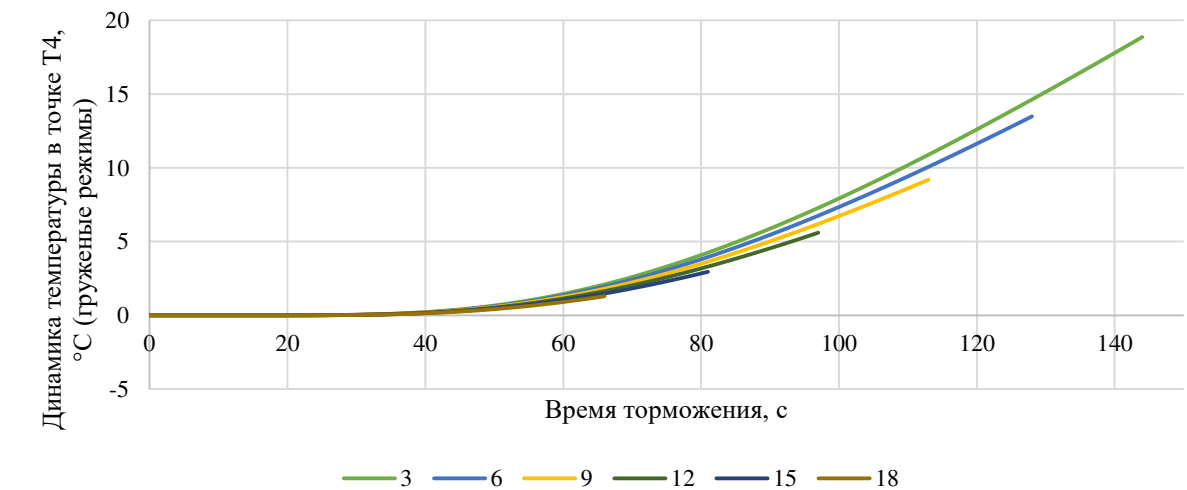
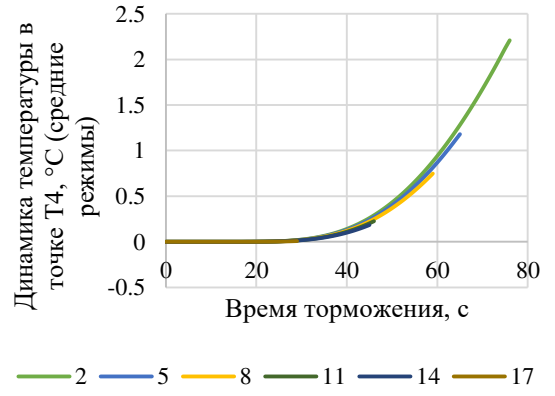
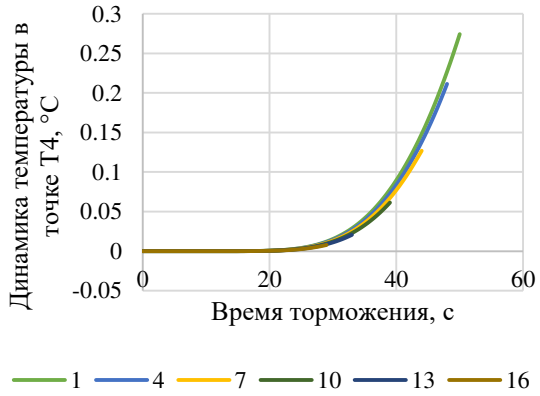
б) динамика температуры в точке T1



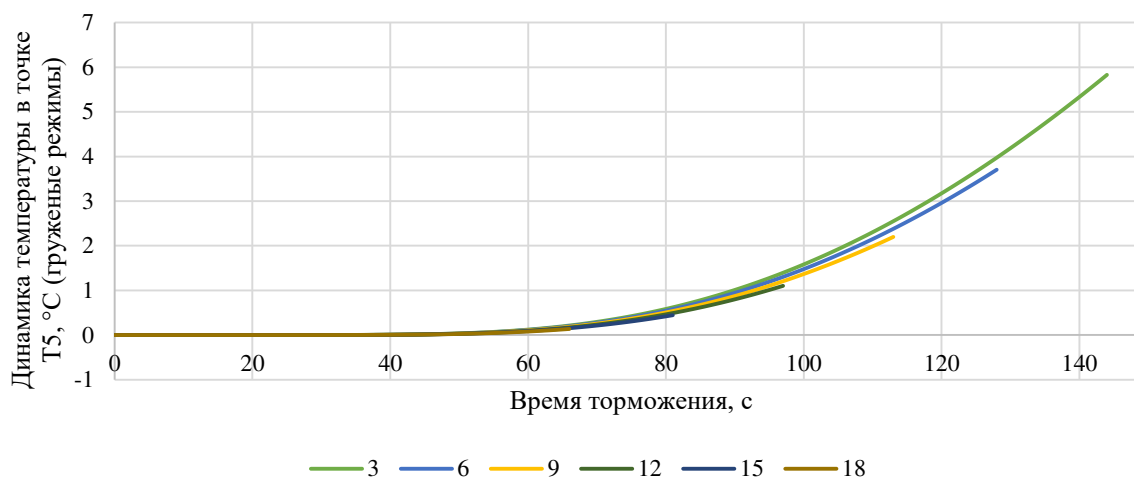
в) динамика температур в точке T2



г) динамика температуры в точке T3



д) динамика температуры в точке Т4



е) динамика температуры в точке Т5

Рисунок 3.2 – Графики динамического изменения температур в точках Т0 – Т5 цельнокатанного колеса в режимах 1 – 18

Как видно из представленных графиков динамического изменения температуры по выбранным точкам на колесе, начиная с зоны соединения обода и диска колеса (окрестности точки Т3) прогрев металла колеса незначителен при порожнем и среднем режимах воздухораспределителя. К примеру, повышение температуры колеса в точке Т3 над температурой окружающего воздуха в порожнем режиме воздухораспределителя составляет не более $1,5^{\circ}\text{C}$, в среднем режиме – порядка 6°C при торможении с начальной скорости 100 км/ч . При торможении с меньших скоростей повышение температуры ещё ниже. В порожнем режиме начиная со скорости начала торможения 90 км/ч повышение температуры уже не превышает 1°C , а в среднем – начиная со скорости 70 км/ч .

Начиная с точки Т5, дальнейший рост температуры по телу колеса практически прекращается даже в груженом режиме (повышение температуры – порядка 6°C). Таким образом, точки Т6 – Т10 в рассмотренных режимах нагреву не подвергаются, либо изменение их температуры ничтожно мало (менее 1°C), в связи с чем результаты расчета по данным точкам не приводятся.

Рассматривая полученные по режимам 1 – 18 результаты расчетов в разрезе влияния скорости начала торможения на максимальную температуру колеса,

можно отметить, что зависимость между указанными величинами практически прямо пропорциональная.

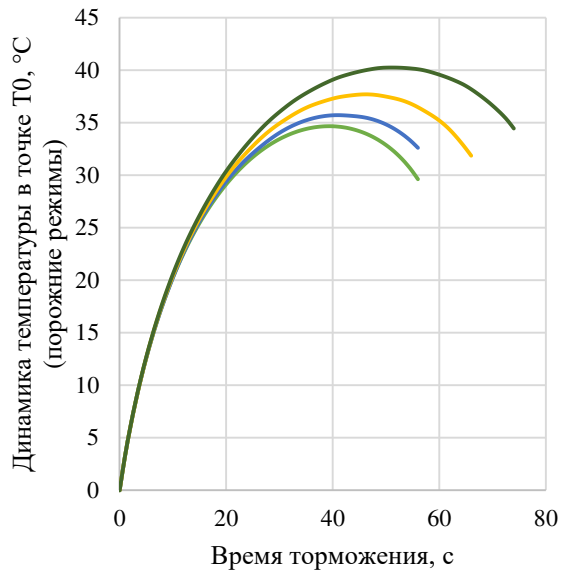
Анализ графиков по точке T0 во всех режимах показывает, что в среднем увеличение скорости начала торможения на 10 км/ч приводит к увеличению максимальной температуры поверхности катания для груженых режимов на 10...15°C, средних – 5...10°C, порожних – 3...5°C.

3.1.2 Влияние уклона пути

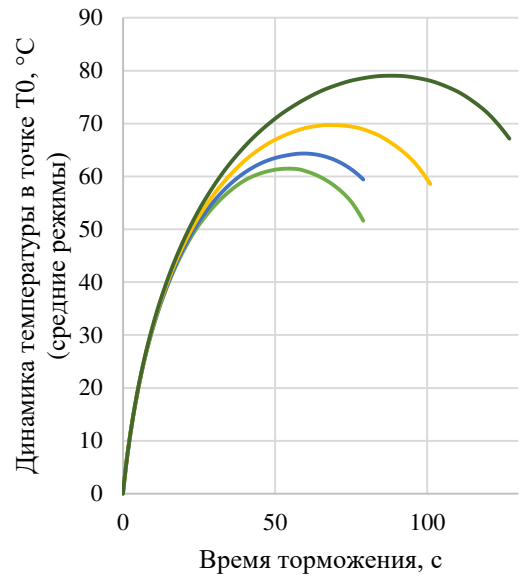
Влияние уклона пути на нагрев колеса оценим на режимах 19 – 30. Исследование проводится при начальной скорости движения вагона 100 км/ч, на спусках с уклонами 2, 6, 12 и 20‰ при различных режимах воздухораспределителя на изношенном колесе и температуре воздуха 0°C.

Результаты расчета приведены на рисунке 3.3 в виде графиков изменения температур в исследуемых точках на протяжении времени торможения поезда. По рисунку 3.3 видно, что в первую треть времени торможения динамика изменения температур в целом мало зависит от уклона. В последующих этапах торможения наибольшая разница в температурах при торможении на различных уклонах достигается при высоких скоростях начала торможения и груженом режиме воздухораспределителя. Так, разница в максимальных температурах колеса на поверхности катания для груженых режимов составляет порядка 25...30°C, для средних режимов – 5...10°C, для порожних режимов – 3...5°C. При удалении от обода колеса (от точки T0 в сторону точки T10) эта разница нивелируется и, начиная с точки T4 становится ничтожной, т.е. температура точек T5 – T10 имеет слабую связь с величиной уклона.

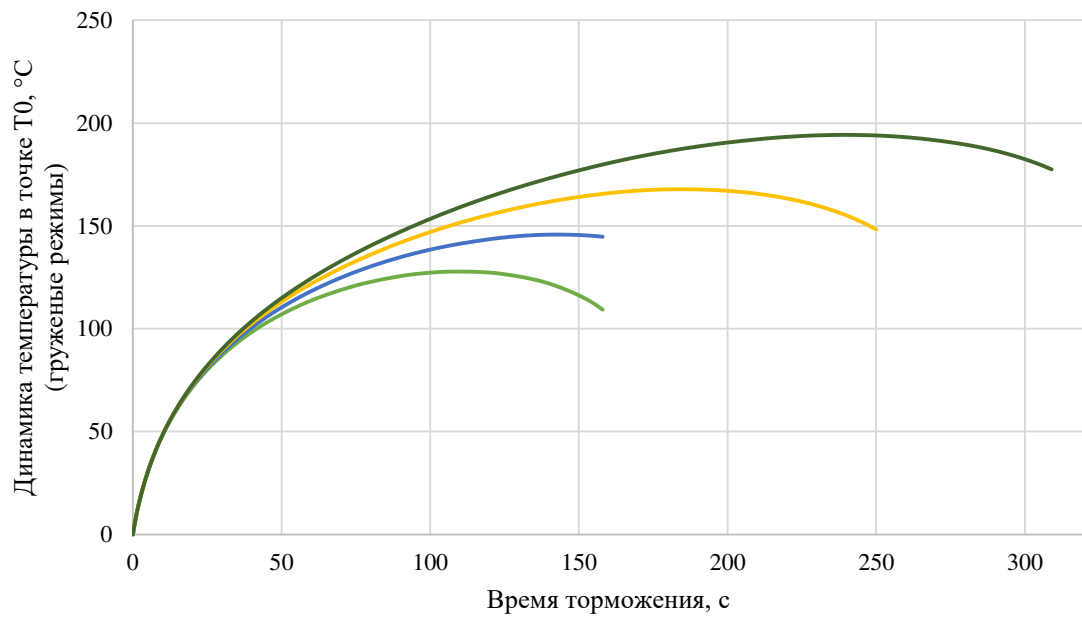
Таким образом, величина уклона пути влияет в основном на значение максимальной температуры колеса на поверхности катания и особенно заметна при больших массах вагонов. Так, для груженого режима разница температур при спуске на уклонах 0‰ и 20‰ составляет 73°C, для среднего режима – 19°C, для порожнего режима – 8°C.



— 19 — 22 — 25 — 28

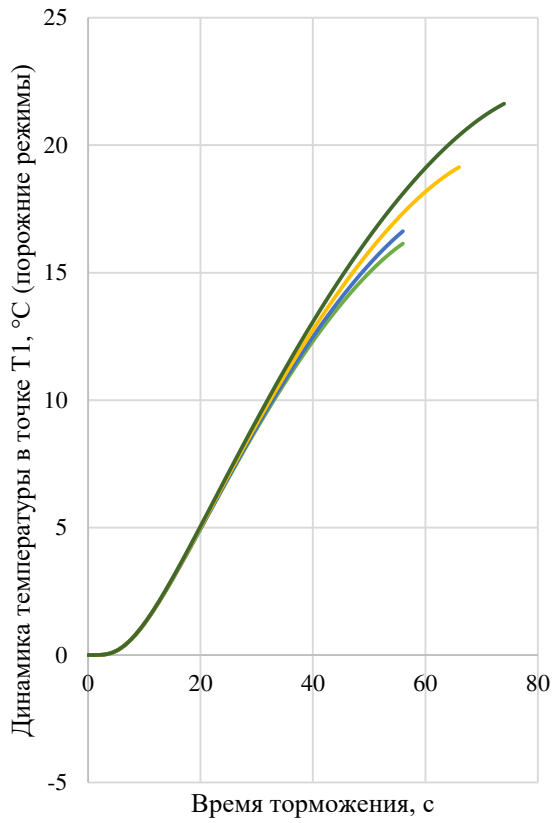


— 20 — 23 — 26 — 29

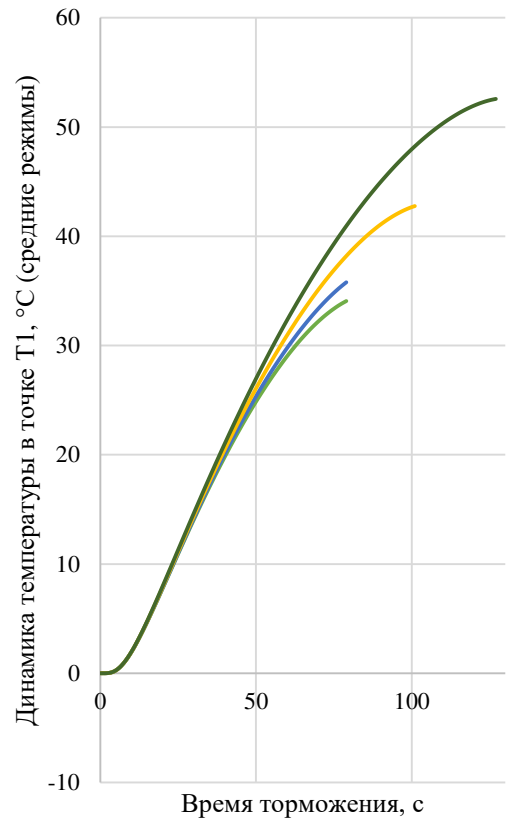


— 21 — 24 — 27 — 30

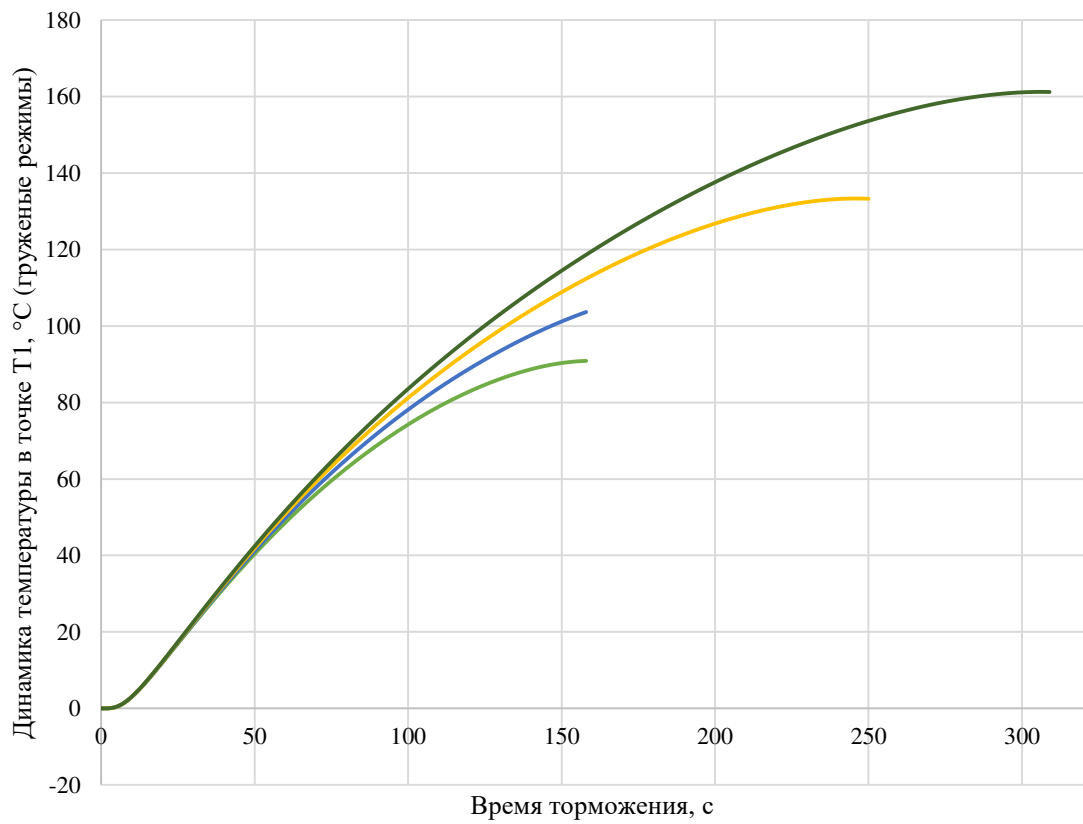
а) динамика температур в точке T0



— 19 — 22 — 25 — 28

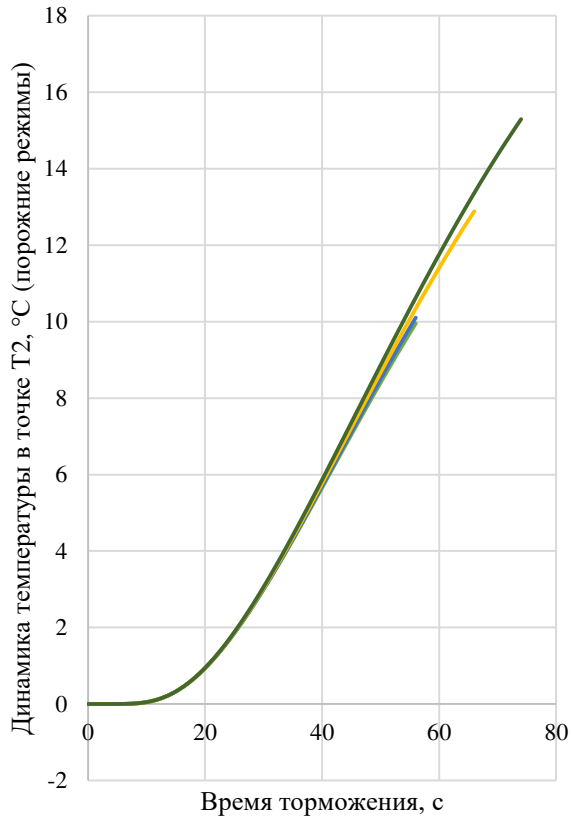


— 20 — 23 — 26 — 29

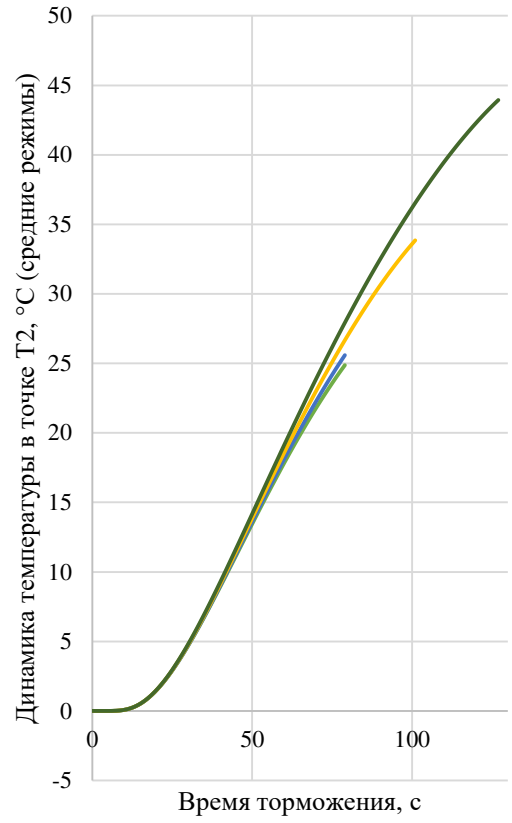


— 21 — 24 — 27 — 30

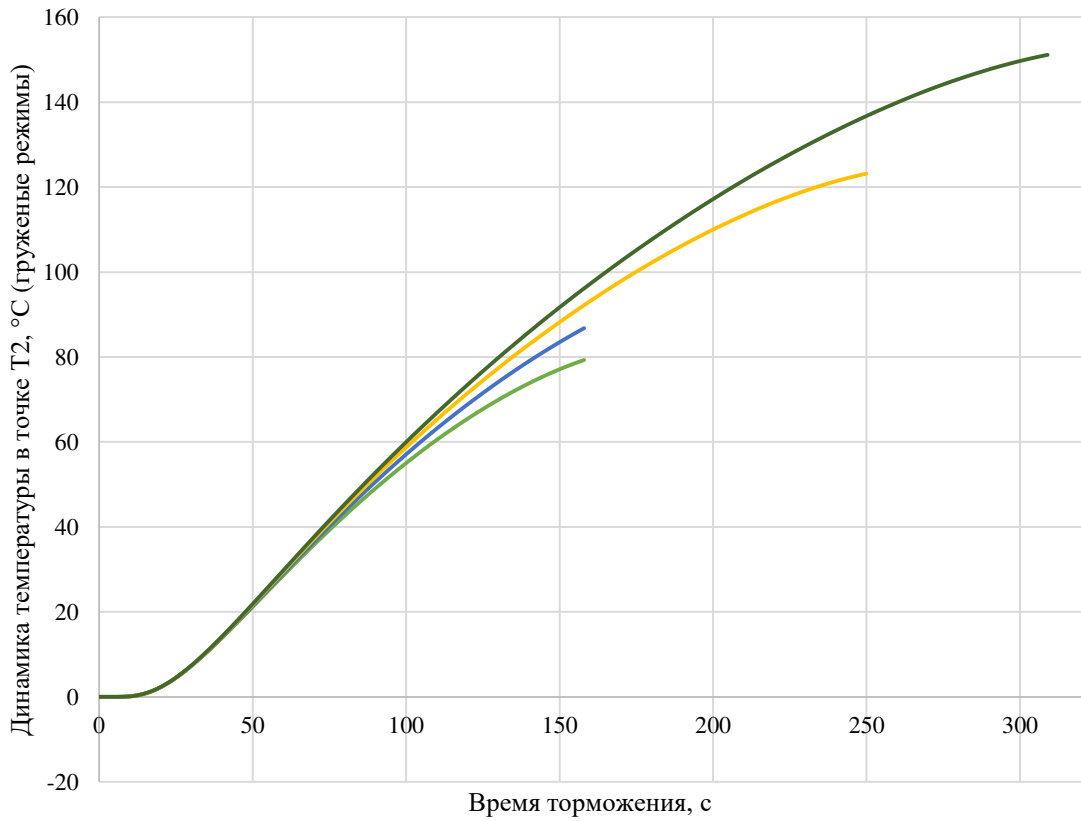
б) динамика температур в точке T1



— 19 — 22 — 25 — 28

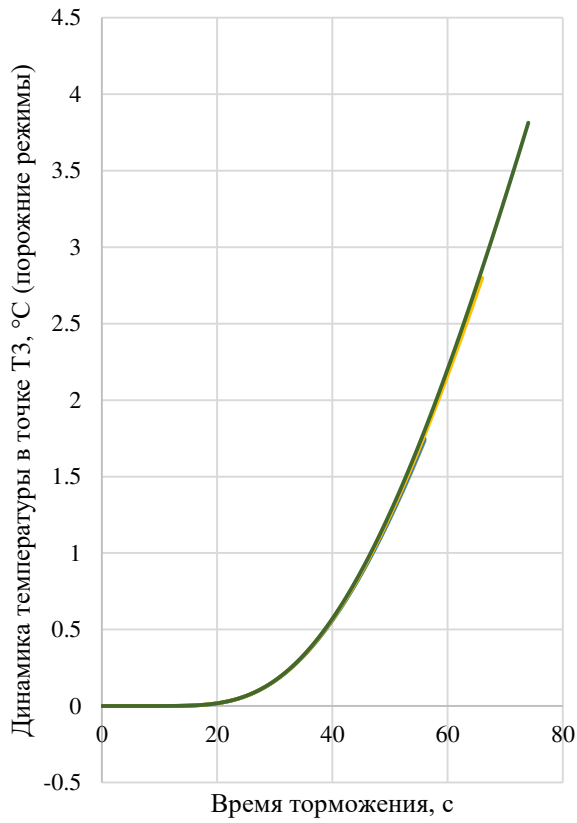


— 20 — 23 — 26 — 29

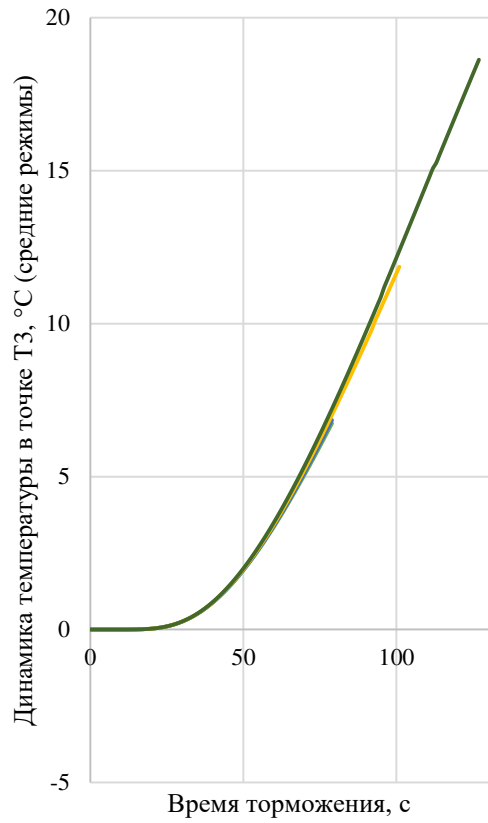


— 21 — 24 — 27 — 30

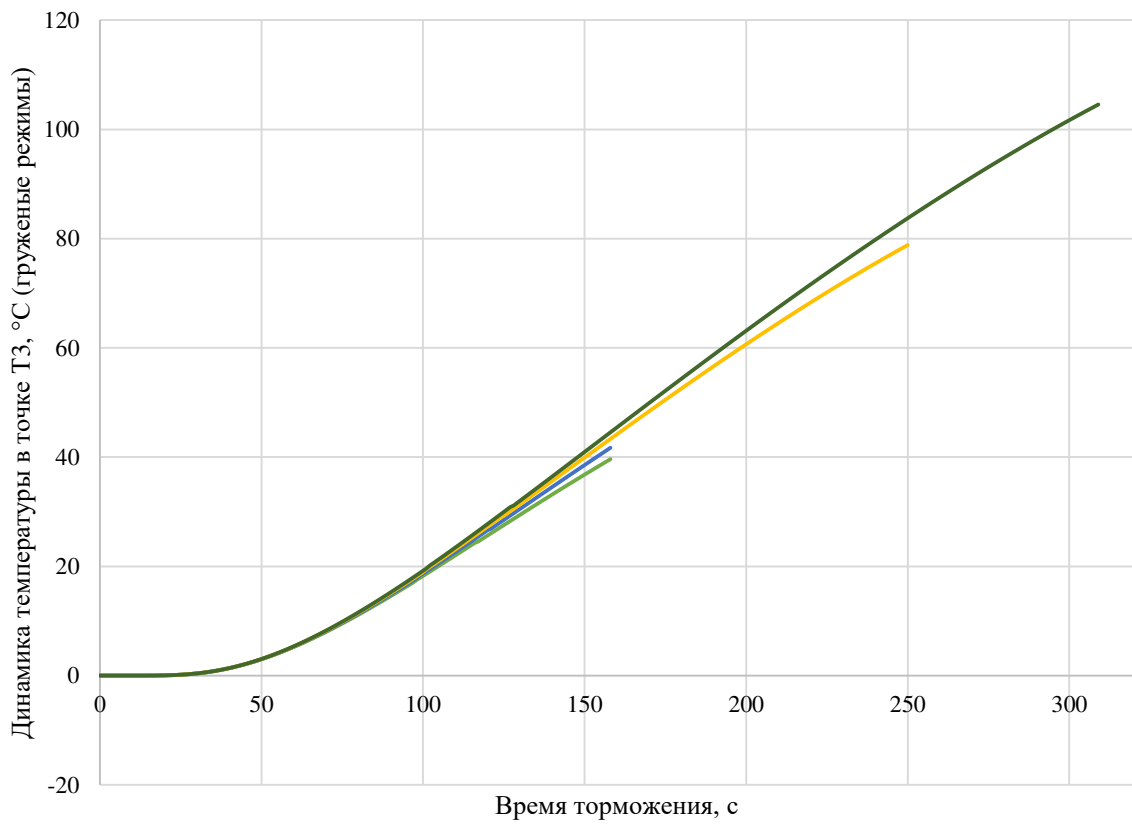
в) динамика температур в точке T2



— 19 — 22 — 25 — 28

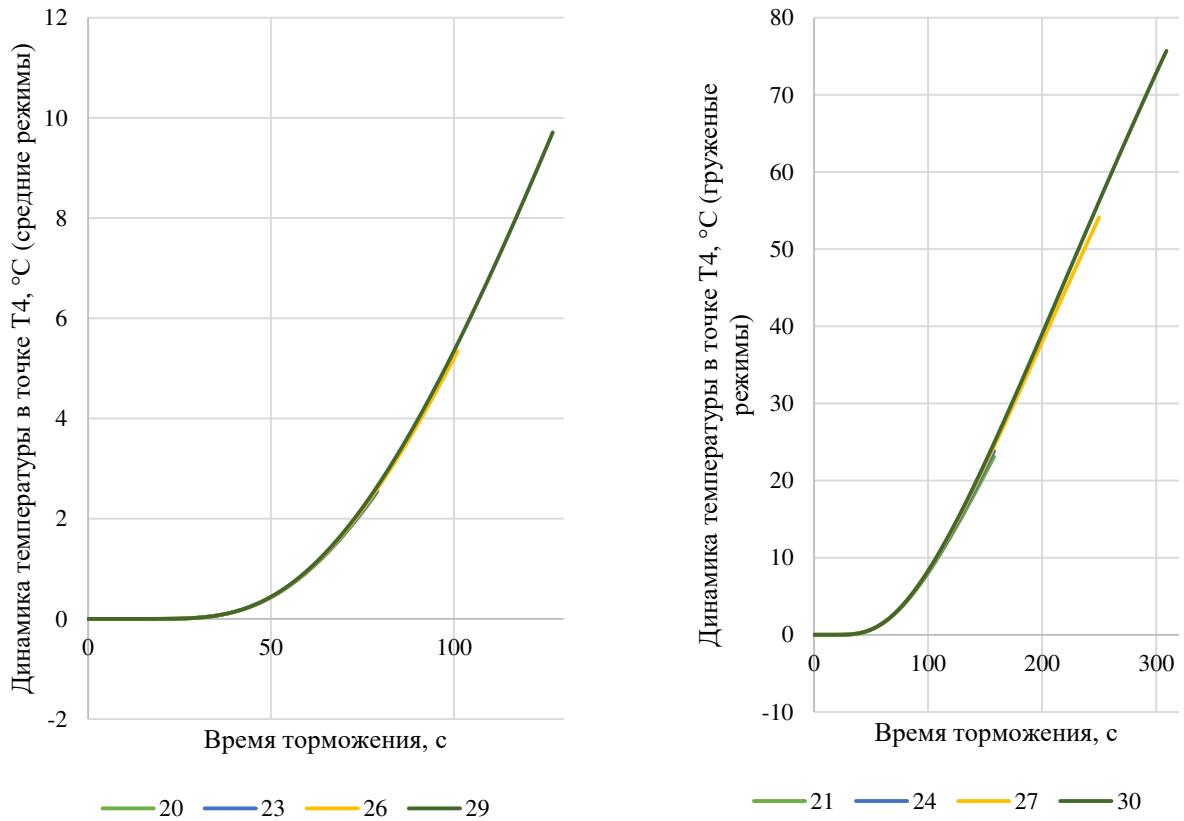


— 20 — 23 — 26 — 29

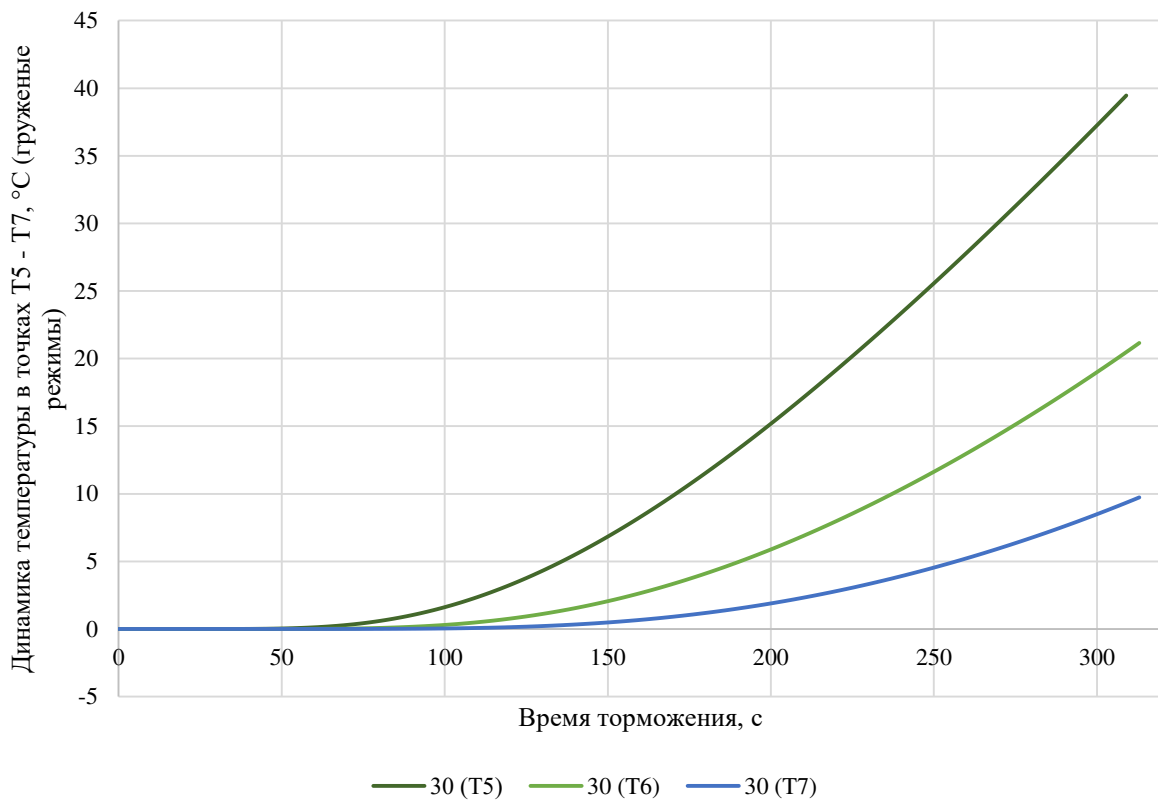


— 21 — 24 — 27 — 30

г) динамика температур в точке T3



д) динамика температур в точке T4



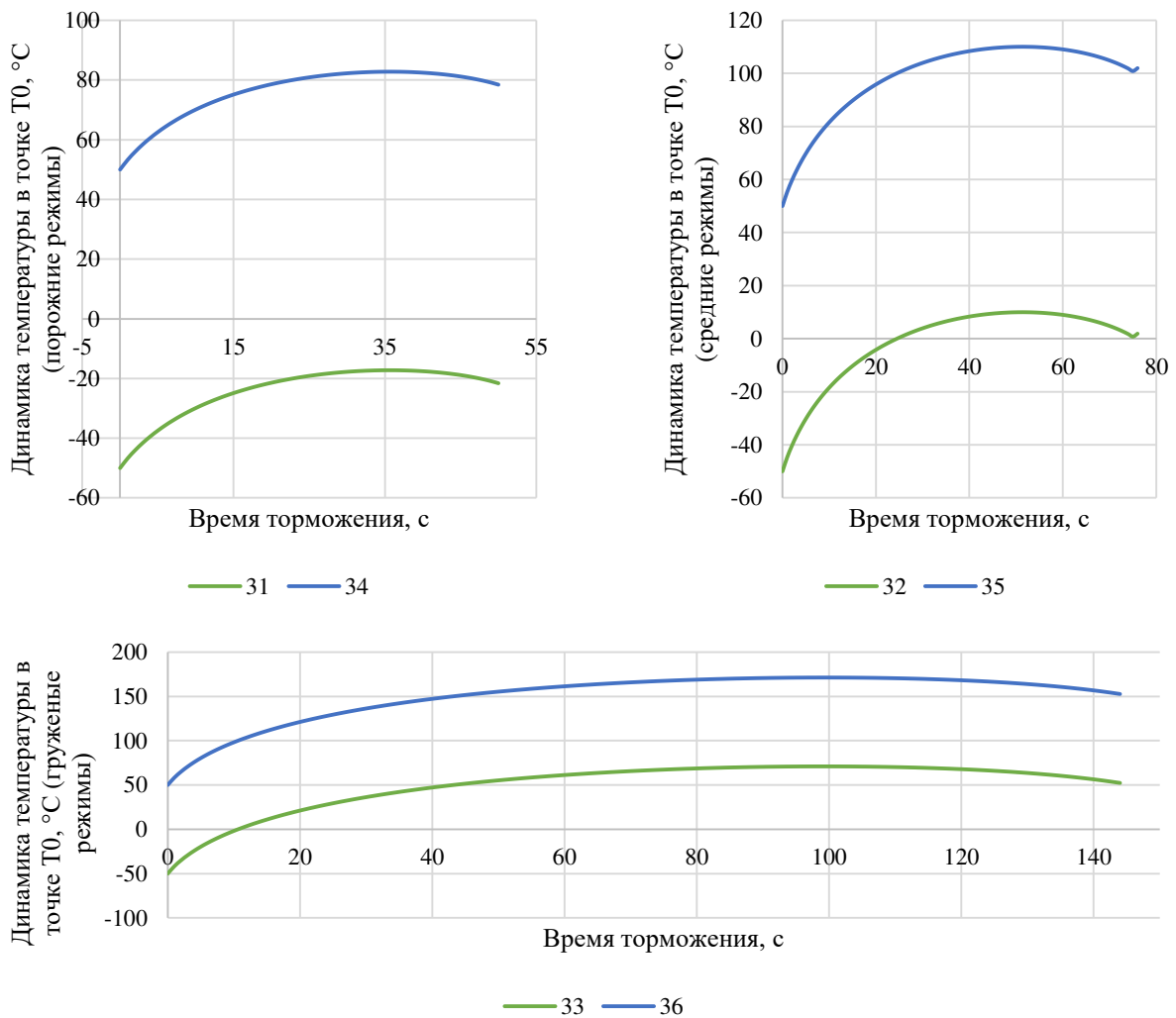
а) динамика температур в точках T5 – T7

Рисунок 3.3 – Графики динамического изменения температур в точках T0 – T7 цельнокатанного колеса в режимах 19 – 30

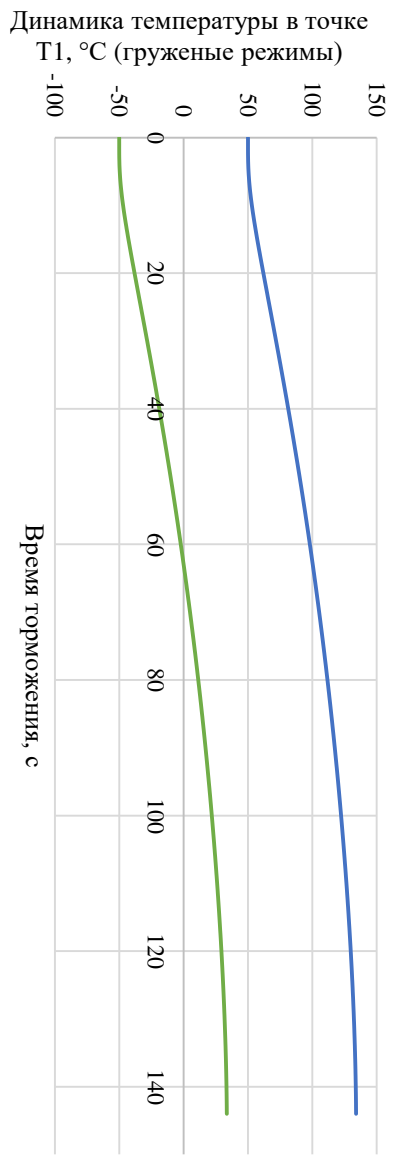
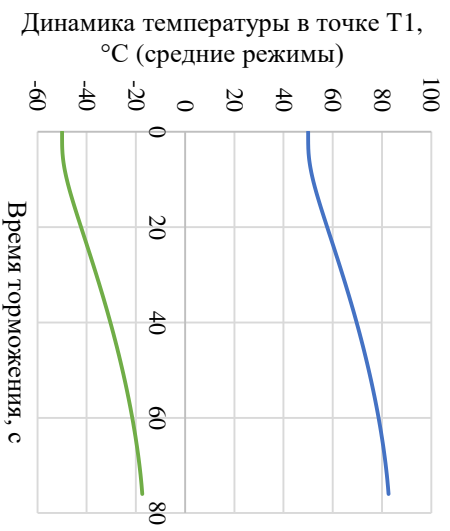
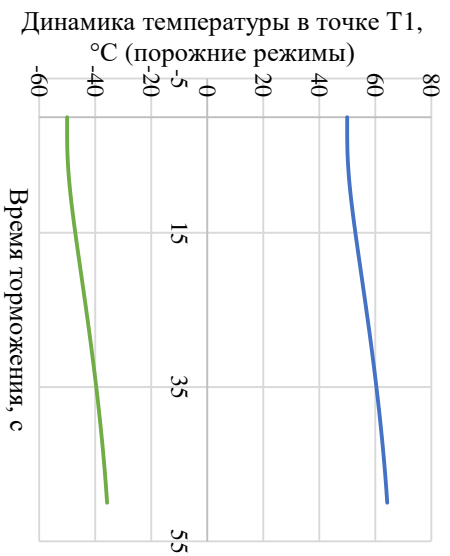
3.1.3 Влияние температуры окружающей среды

Влияние температуры окружающей среды на нагрев колеса оценим на режимах 31 – 36. Исследование проводится при скорости движения вагона 100 км/ч на площадке (уклон $i = 0\%$) при различных режимах воздухораспределителя на неизношенном колесе и температурах воздуха минус 50°C и плюс 50°C .

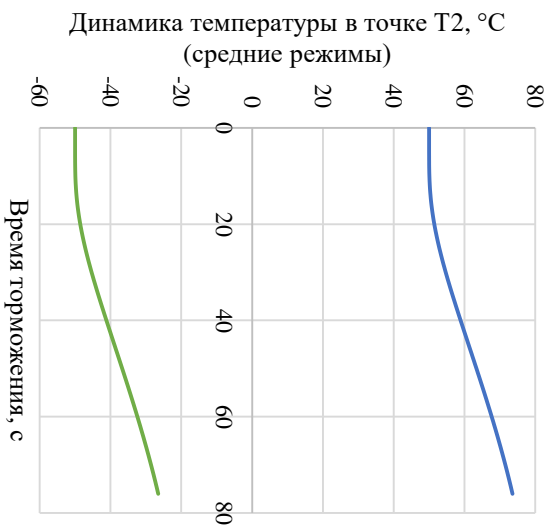
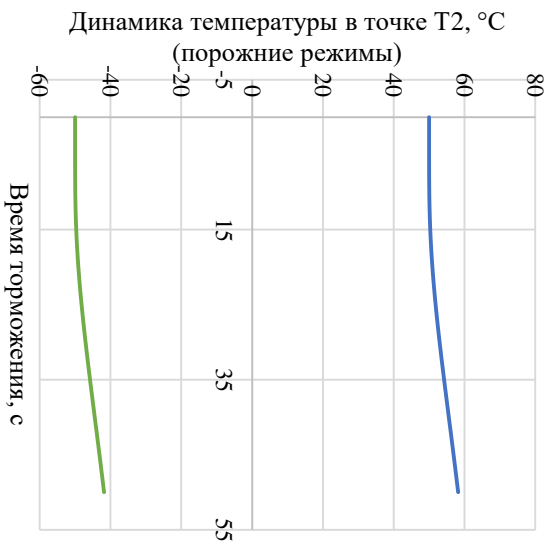
Результаты расчета по данным режимам приведены на рисунке 3.4 в виде графиков изменения температур в исследуемых точках на протяжении времени торможения поезда.

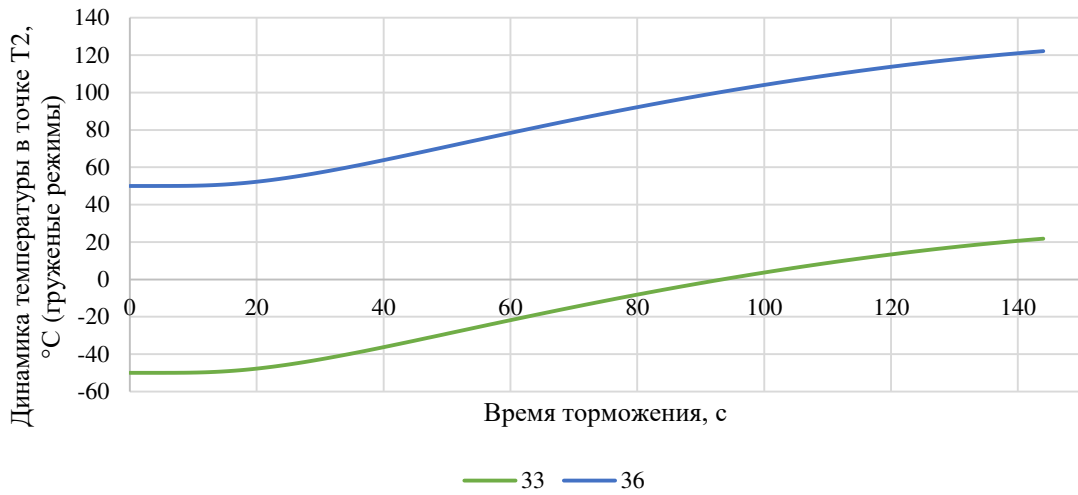


а) динамика температур в точке T0

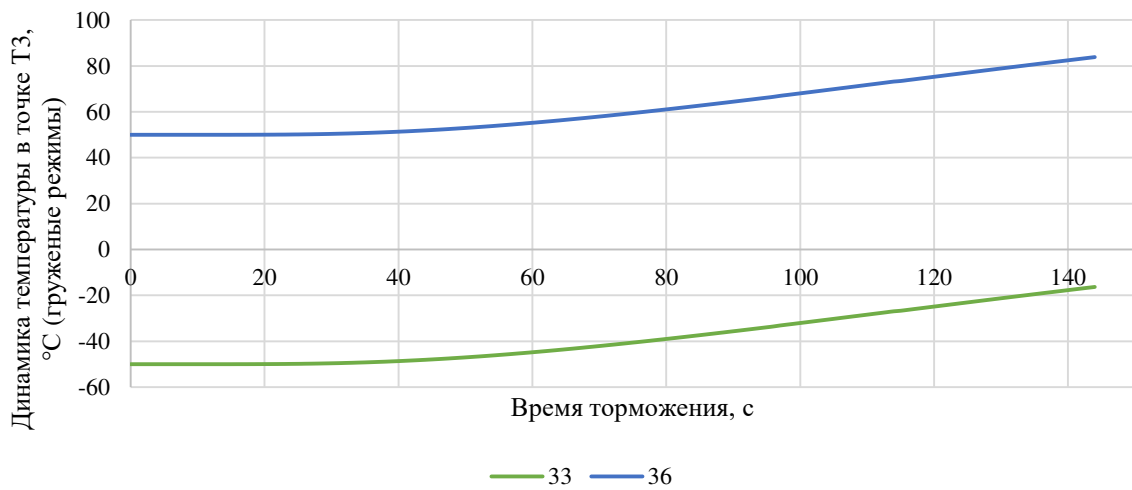
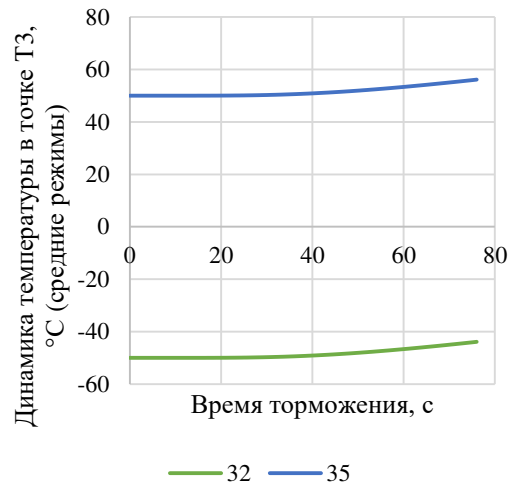
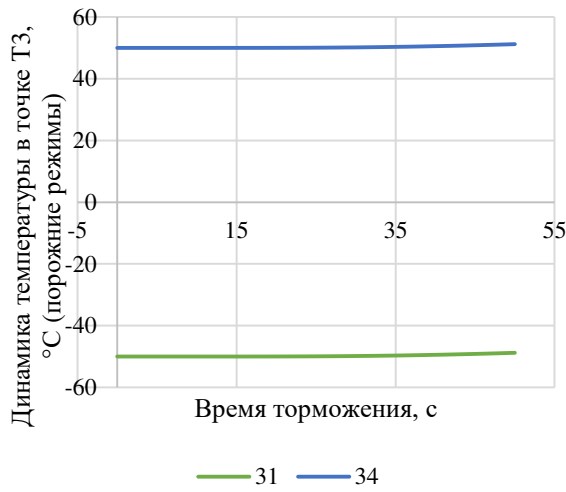


б) динамика температур в точке T1





в) динамика температур в точке T2



г) динамика температур в точке T3

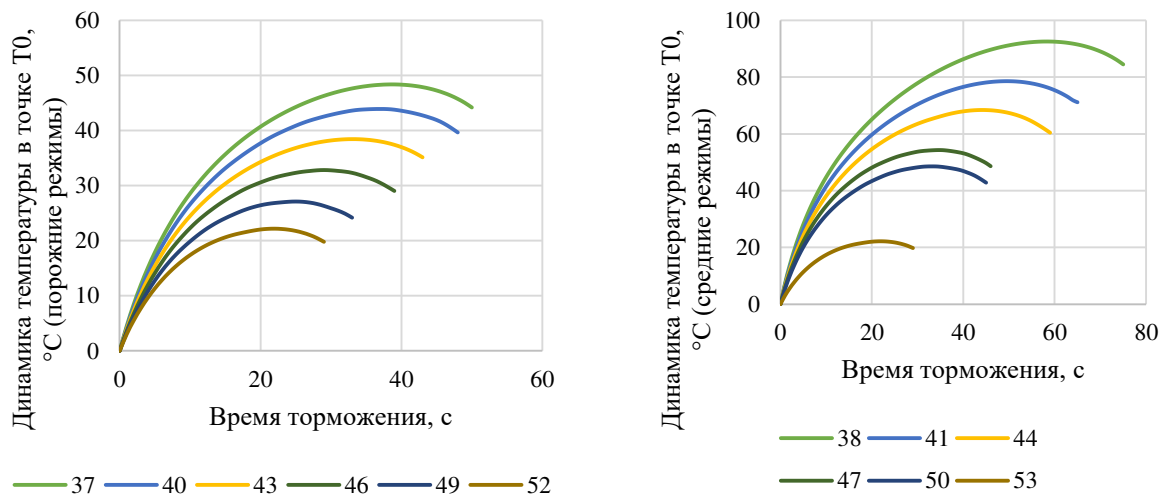
Рисунок 3.4 – Графики динамического изменения температур в точках T0 – T4

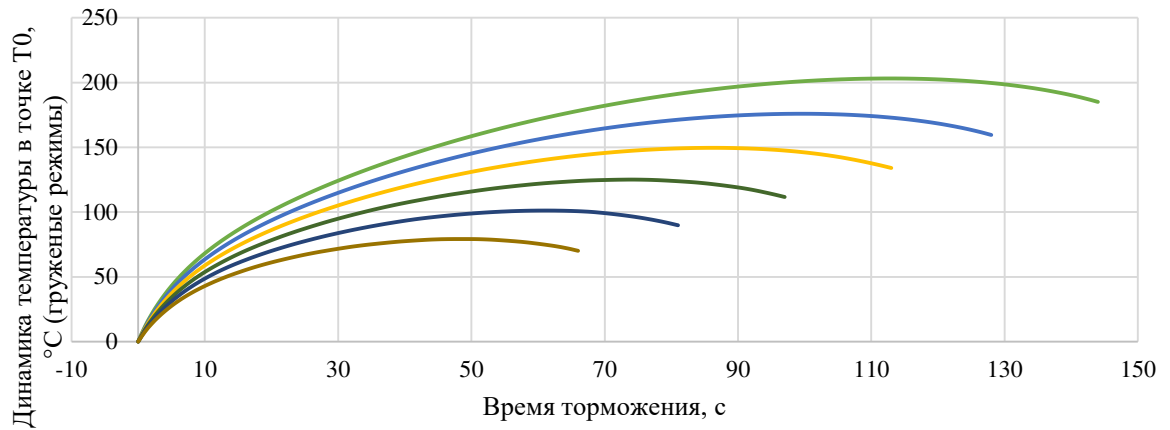
Анализ полученных результатов показывает, что температура окружающей среды не оказывает существенного влияния на процесс нагрева колеса при колодочном торможении. Максимальная разница абсолютных повышений температур по рассмотренным точкам не превышает $0,5 - 1^{\circ}\text{C}$ при различных температурах окружающей среды.

3.1.4 Влияние износа колеса

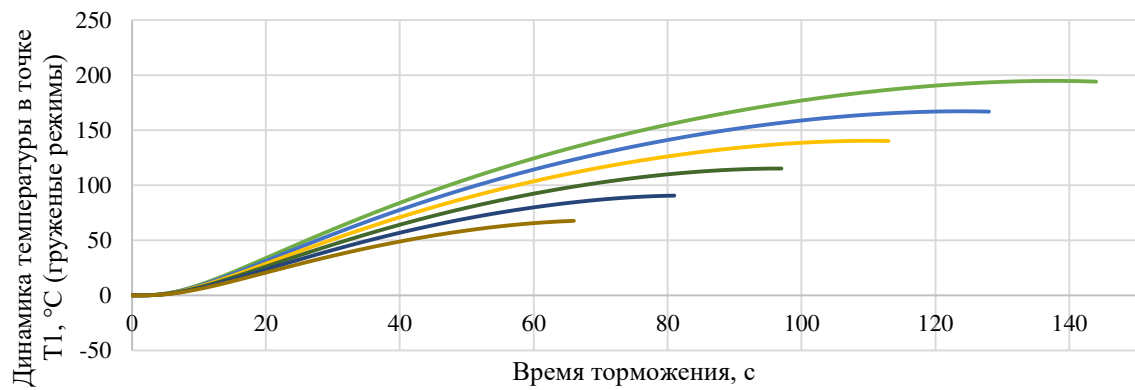
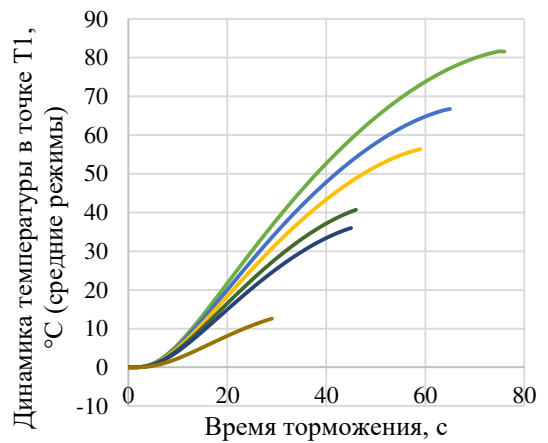
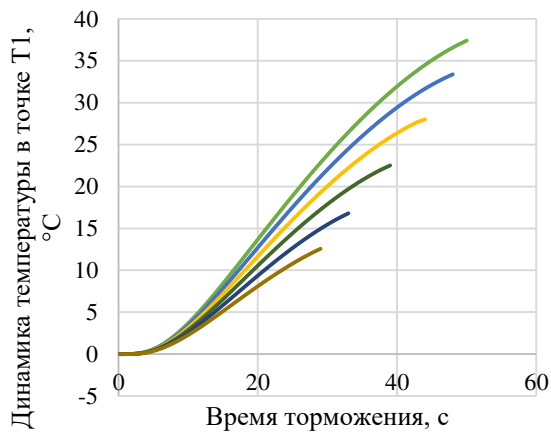
Влияние температуры окружающей среды на нагрев колеса оценим на режимах 37 – 54. Исследование проводится при скоростях $50 \dots 100$ км/ч с шагом 10 км/ч, на площадке (уклон $i = 0\%$) при различных режимах воздухораспределителя на полностью изношенном колесе (толщина обода составляет 22 мм) и температуре воздуха 0°C .

Результаты расчета по данным режимам приведены на рисунке 3.5 в виде графиков изменения температур в исследуемых точках на протяжении времени торможения поезда.

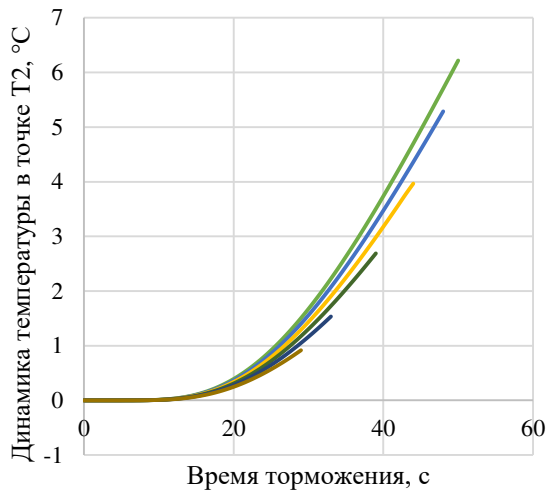




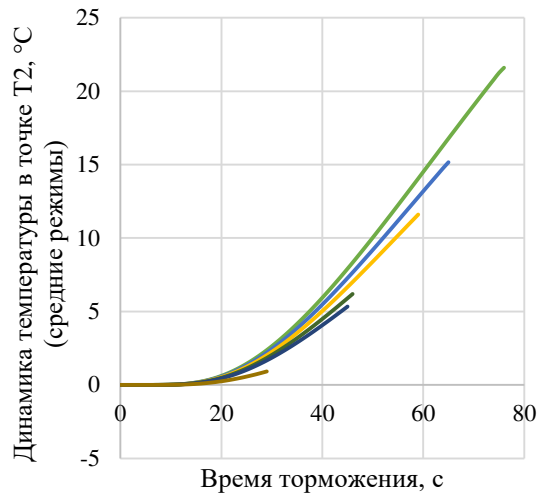
а) динамика температур в точке T0



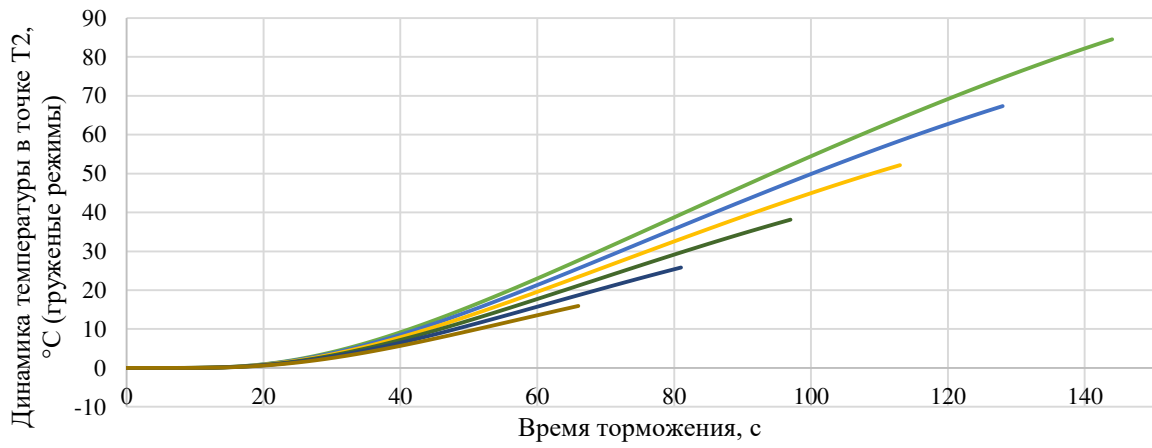
б) динамика температур в точке T1



— 37 — 40 — 43 — 46 — 49 — 52

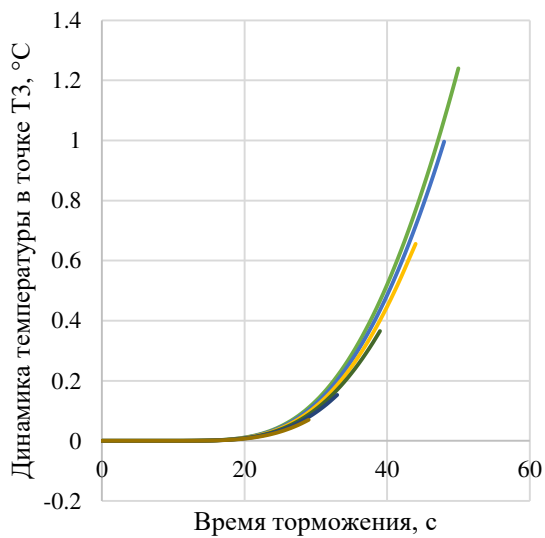


— 38 — 41 — 44 — 47 — 50 — 53

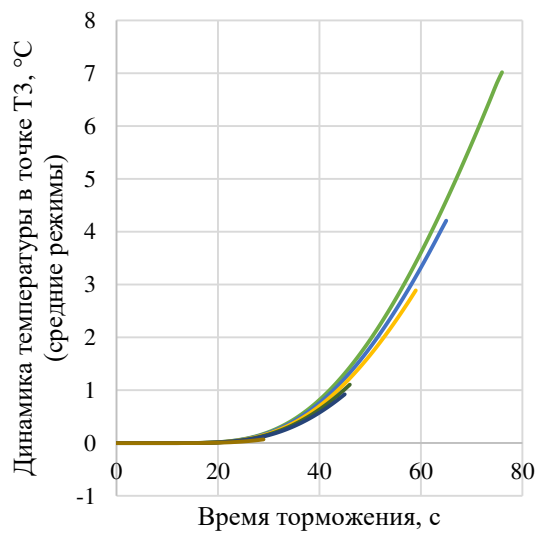


— 39 — 42 — 45 — 48 — 51 — 54

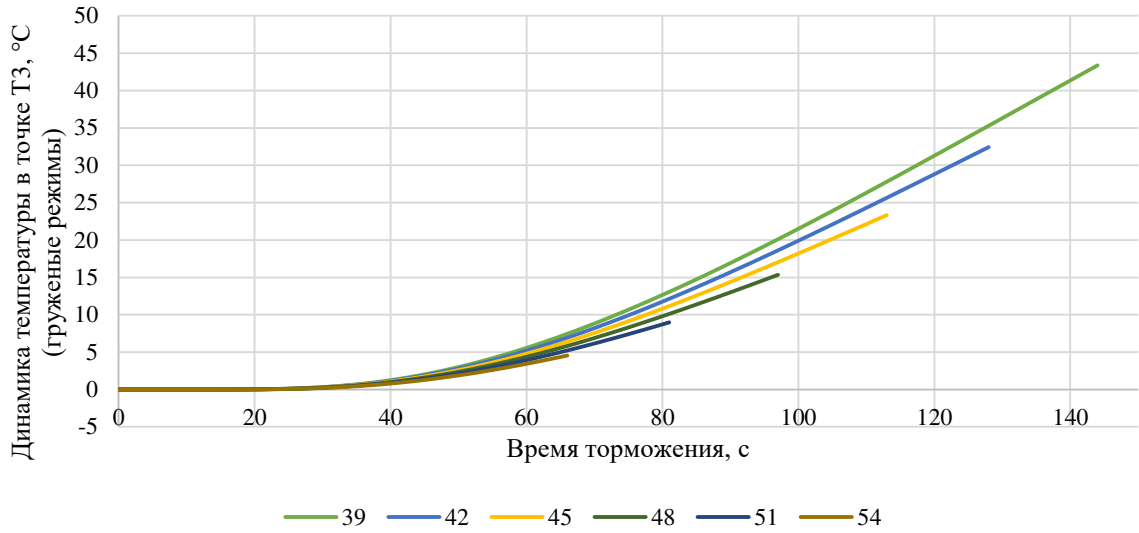
в) динамика температур в точке T2



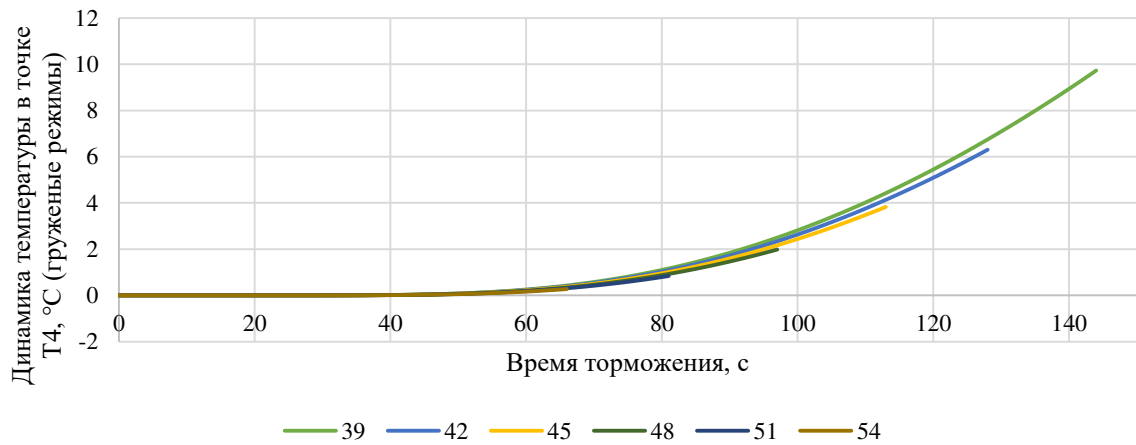
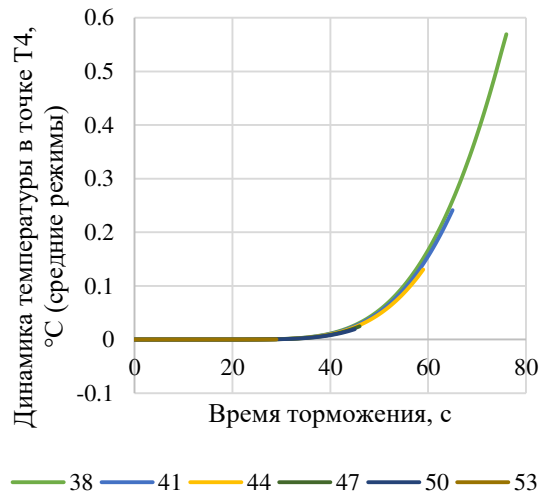
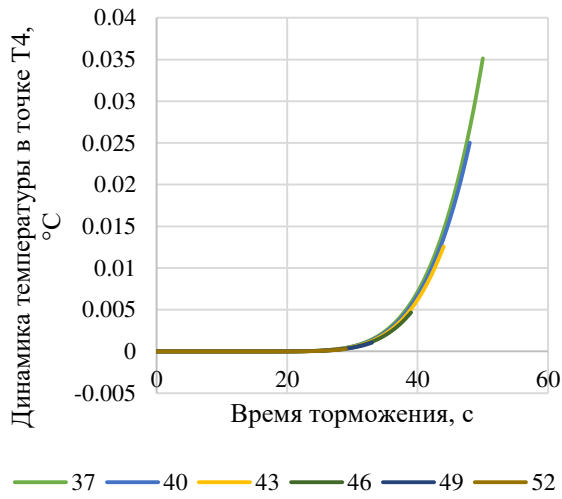
— 37 — 40 — 43 — 46 — 49 — 52



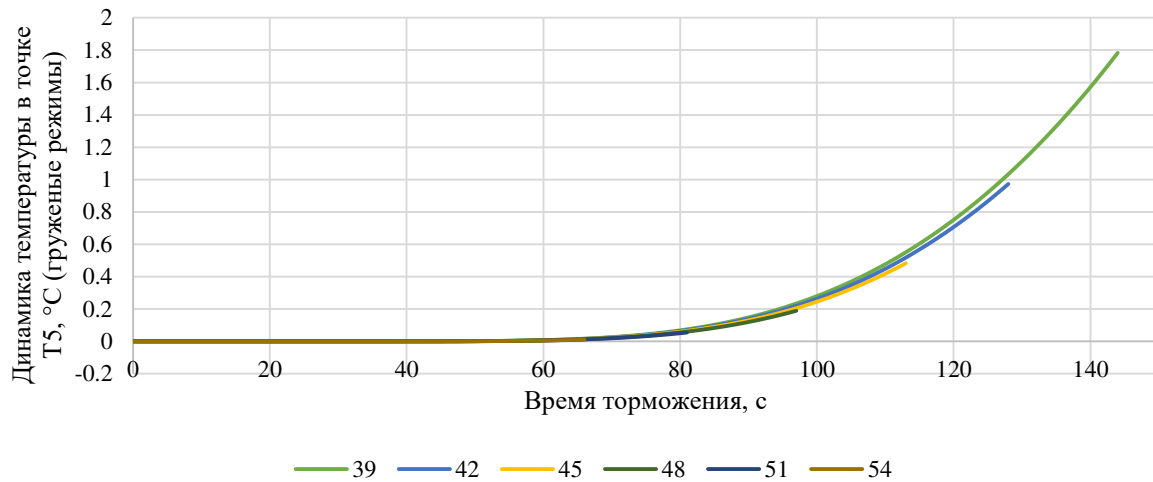
— 38 — 41 — 44 — 47 — 50 — 53



г) динамика температур в точке T3



д) динамика температур в точке T4



д) динамика температур в точке T5

Рисунок 3.5 – Графики динамического изменения температур в точках T0 – T5 цельнокатанного колеса в режимах 37 – 54

Изнюшенное колесо нагревается значительно интенсивнее неизнющенного за счёт меньшего нагреваемого объема обода колеса. Так для груженого режима максимальная температура поверхности катания изнющенного колеса при скорости начала торможения 100 км/ч составляет 203°C, порожнего – 48°C. Сравнивая графики на рисунках 3.2 и 3.5, видим значительную разницу в максимальных температурах на поверхности катания колеса. Для груженных режимов эта разница составляет около 80°C, средних – 35...40°C, порожних – 15...20°C. По мере удаления от обода колеса, картина распределения температур выравнивается. Например, начиная с точки T2, разница температур между изнющенным и неизнющенным колесами в груженных режимах составляет не более 15°C, порожних – не более 2...3°C. В точке T3 разница температур становится практически ничтожной (0,5...1°C).

Таким образом, как и в случае исследования влияния уклона пути, износ обода колеса оказывает значительное влияние в основном на максимальную температуру поверхности катания колеса.

3.1.5 Влияние режима воздухораспределителя

Оценим влияние режима воздухораспределителя на нагрев колеса, пользуясь результатами расчетов по режимам 1 – 18. Для удобства анализа в таблице 3.2 приведём результаты расчетов в числовом виде.

Таблица 3.2 – Результаты расчетов по режимам 1 – 18

Режим / точка контроля	T0	T1	T2	T3	T4	T5
1 (п)	32.77	14.30	8.20	1.21	0.27	–
2 (с)	60.02	32.54	23.41	6.10	2.21	–
3 (г)	121.19	83.82	72.05	33.81	18.87	5.83
4 (п)	29.91	12.72	7.11	0.98	0.21	–
5 (с)	51.96	26.19	17.60	3.79	1.18	–
6 (г)	106.48	70.93	59.67	25.66	13.49	3.70
7 (п)	26.37	10.60	5.56	0.67	0.13	–
8 (с)	45.78	21.93	14.08	2.66	0.75	–
9 (г)	92.20	58.70	48.22	18.77	9.20	2.20
10 (п)	22.70	8.45	4.03	0.39	0.06	–
11 (с)	37.18	15.49	8.47	1.11	0.23	–
12 (г)	78.64	47.34	37.36	12.71	5.60	1.10
13 (п)	18.89	6.24	2.53	0.18	0.02	–
14 (с)	33.36	13.68	7.38	0.93	0.18	–
15 (г)	65.25	36.49	27.19	7.65	2.95	0.44
16 (п)	15.54	4.65	1.64	0.09	0.01	–
17 (с)	26.85	9.70	9.70	0.40	0.06	–
18 (г)	52.57	26.70	18.30	4.06	1.29	0.14

В среднем и груженом режимах воздухораспределителя наблюдается интенсивный нагрев не только поверхности катания колеса, но и прогрев тела колеса вдоль обода. В порожних режимах значимые изменения температур происходят в основном в области точек T0-T1, в средних режимах эта зона расширяется – T0-T2, для груженых режимов при торможении с высоких скоростей – T0-T5.

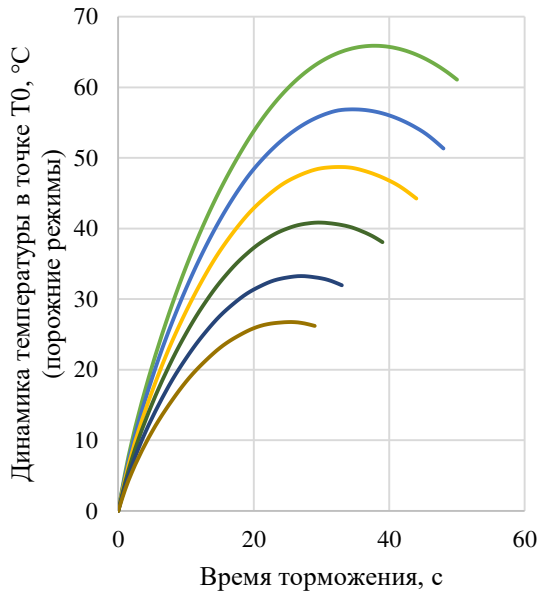
Очевидно, что максимальные температуры поверхности катания колеса достигаются на груженых режимах при высоких скоростях начала торможения. В зависимости от начальной скорости разница температур для порожнего и груженого режима составляет от 37°C (начальная скорость 50 км/ч) до 88°C (начальная скорость 100 км/ч). Анализируя результаты, приведенные в таблице 3.2, можно также прийти к выводу, что повышение скорости начала торможения на 10 км/ч в среднем

приводит к росту разницы максимальных температур в порожнем и груженом режимах на $10,28^{\circ}\text{C}$.

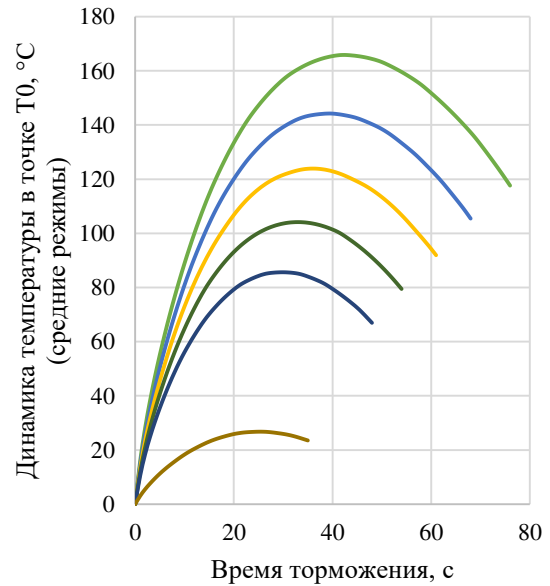
3.1.6 Влияние материала-наполнителя колодки

Влияние материала-наполнителя колодки предлагается рассмотреть на режимах 55 – 72 при скоростях движения вагона $50 \dots 100$ км/ч с шагом 10 км/ч, на площадке (уклон $i = 0\%$) при различных режимах воздухораспределителя на неизношенном колесе и температуре воздуха 0°C .

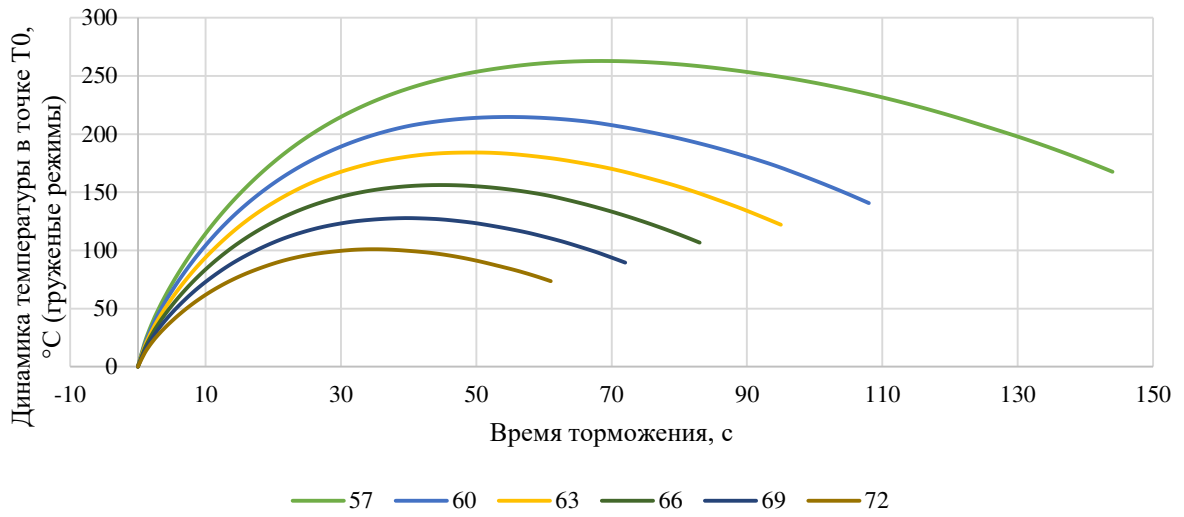
Результаты расчета по данным режимам приведены на рисунке 3.6 в виде графиков изменения температур в исследуемых точках на протяжении времени торможения поезда.



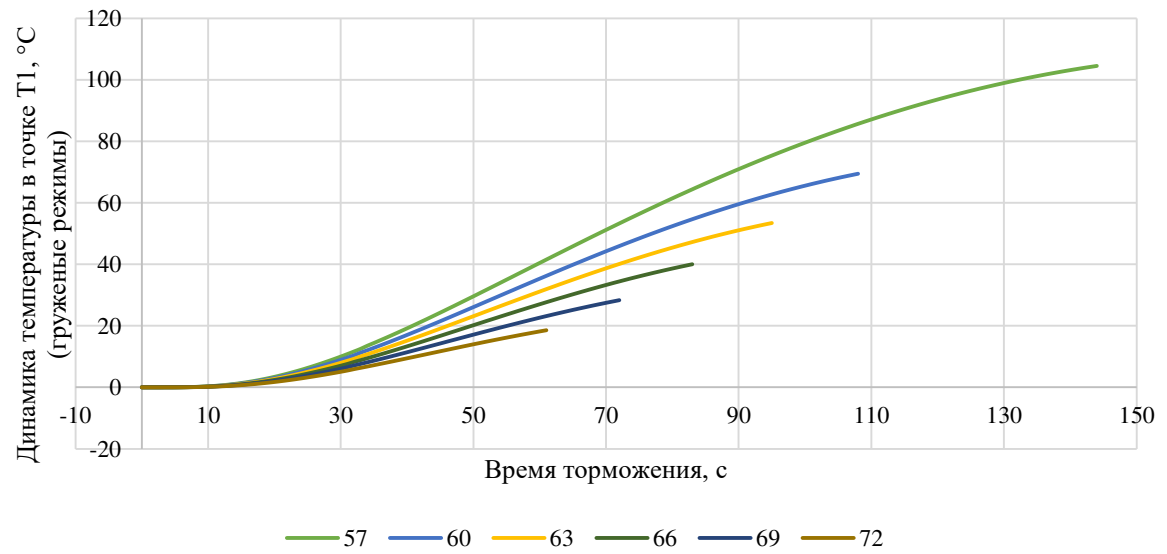
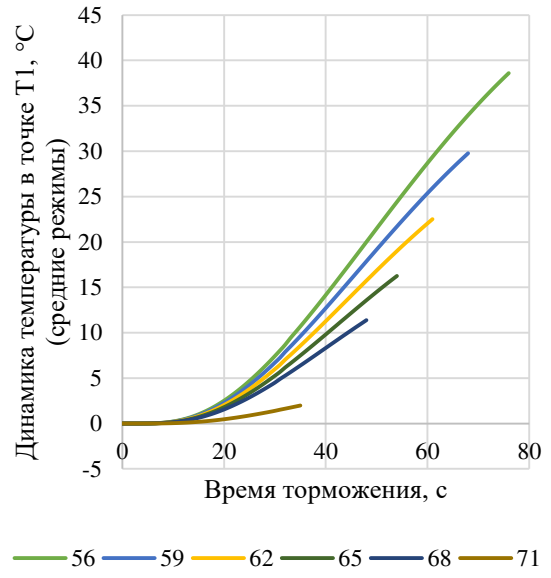
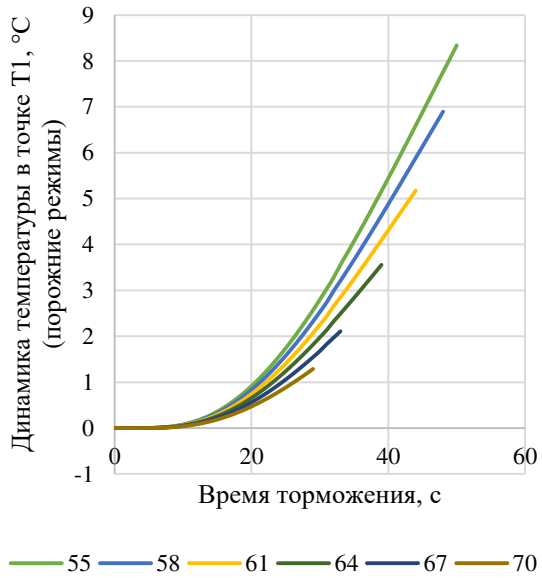
— 55 — 58 — 61 — 64 — 67 — 70



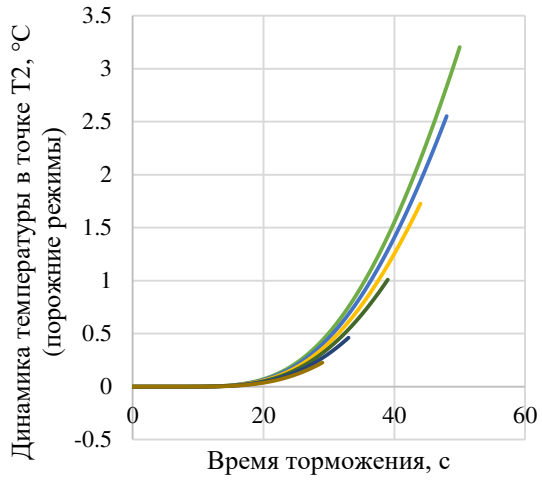
— 56 — 59 — 62 — 65 — 68 — 71



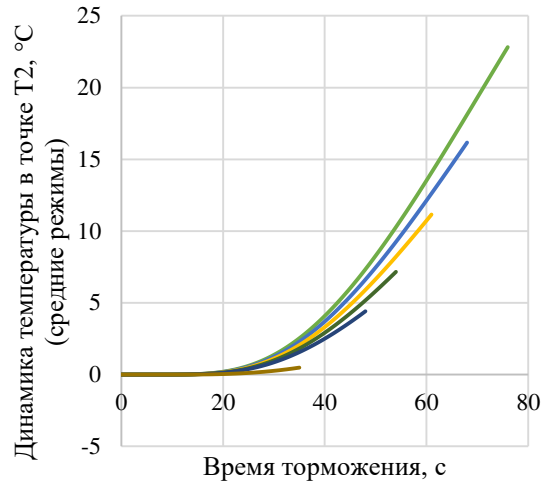
а) динамика температуры в точке T0



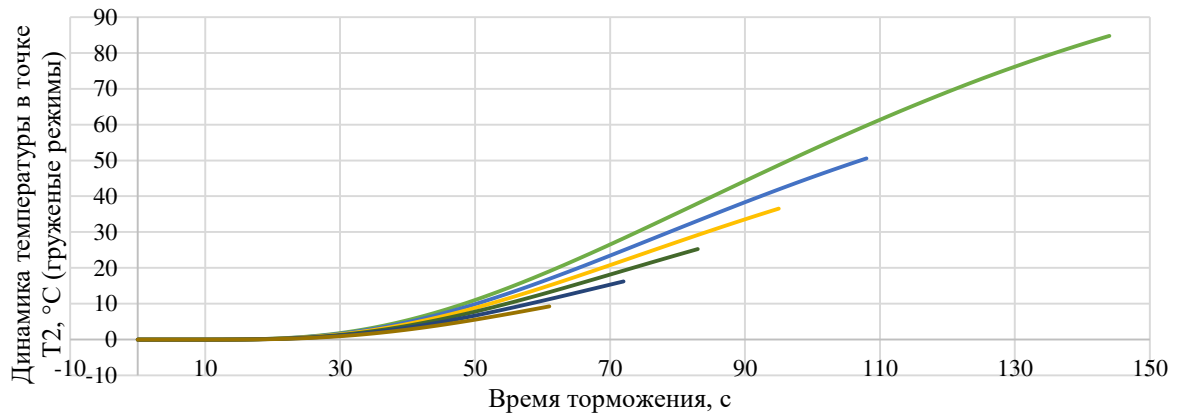
б) динамика температуры в точке T1



— 55 — 58 — 61 — 64 — 67 — 70

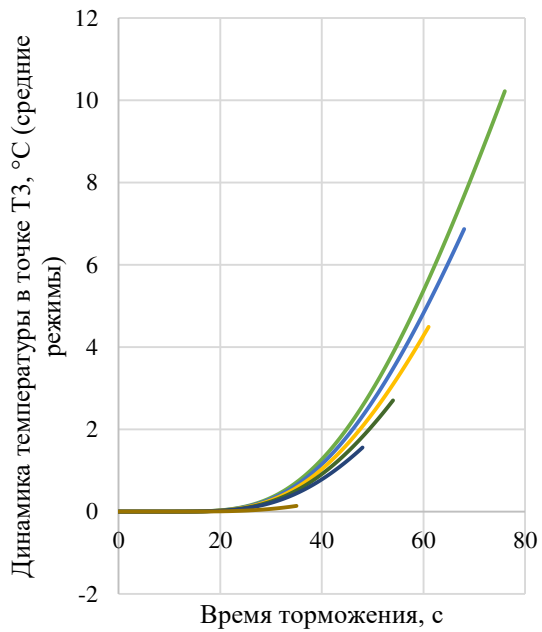


— 56 — 59 — 62 — 65 — 68 — 71

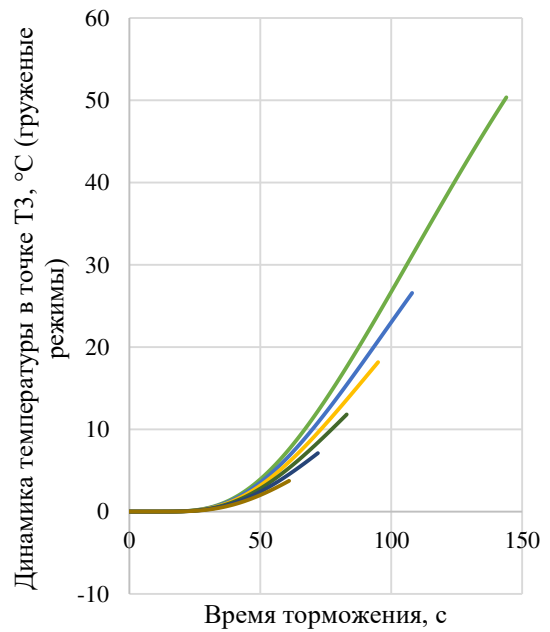


— 57 — 60 — 63 — 66 — 69 — 72

в) динамика температур в точке T2

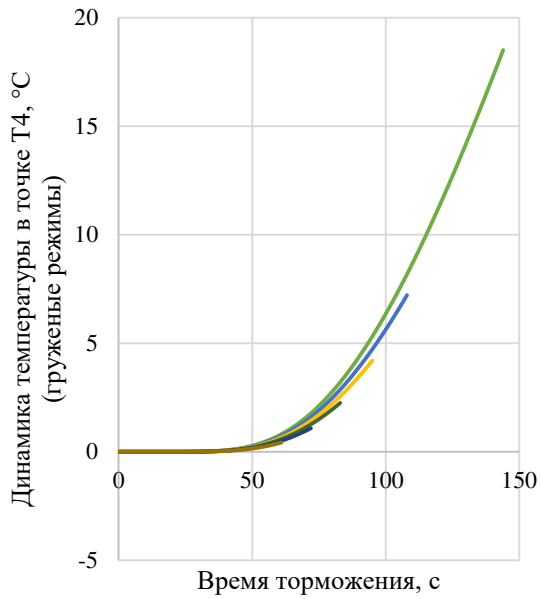


— 56 — 59 — 62 — 65 — 68 — 71



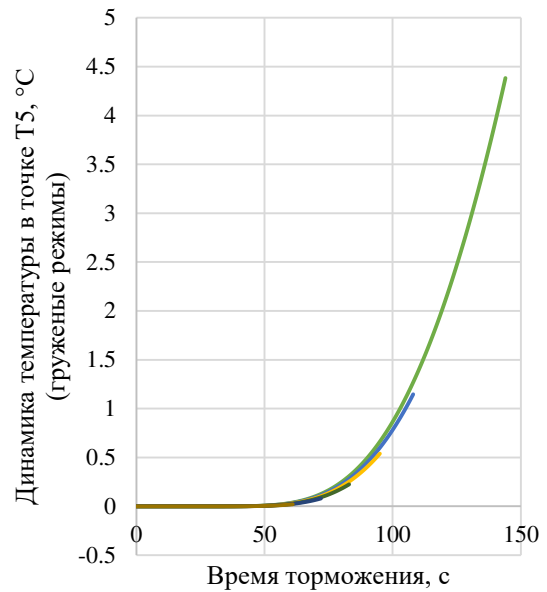
— 57 — 60 — 63 — 66 — 69 — 72

г) динамика температуры в точке T3



— 57 — 60 — 63 — 66 — 69 — 72

д) динамика температуры в точке T4



— 57 — 60 — 63 — 66 — 69 — 72

е) динамика температуры в точке T5

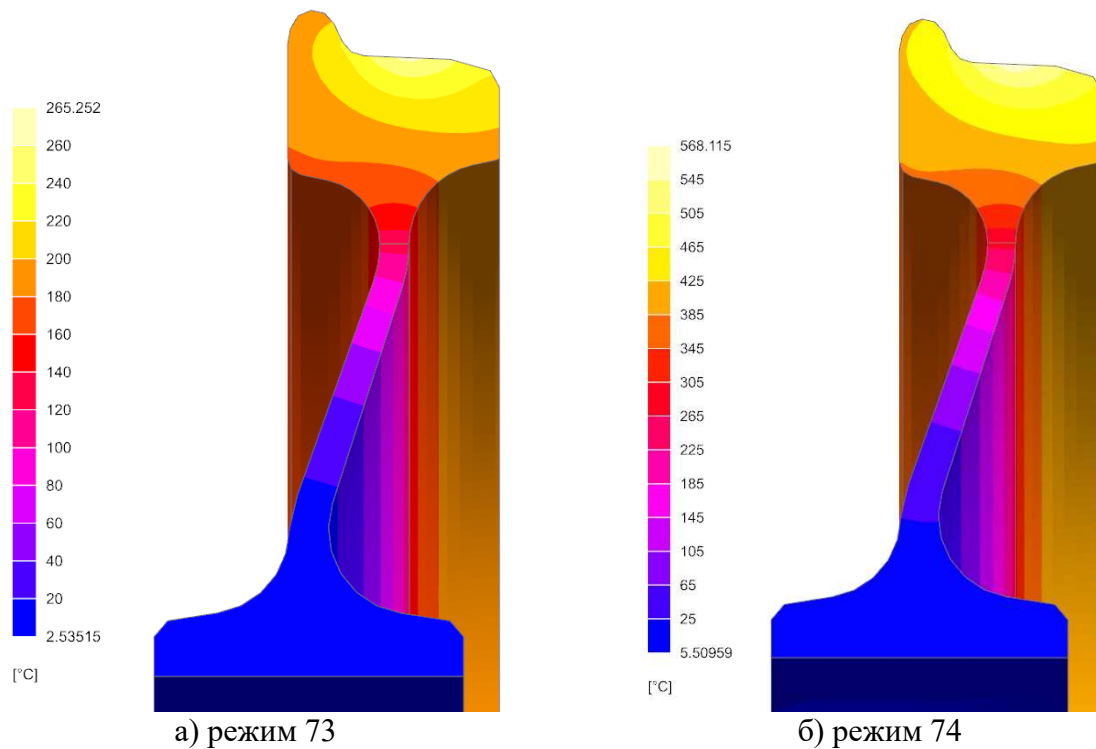
Рисунок 3.6 – Графики динамического изменения температур в точках T0 – T5 цельнокатанного колеса в режимах 55 – 72

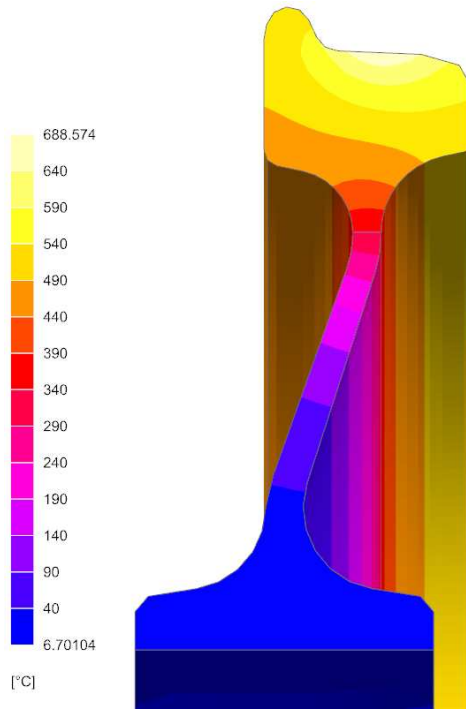
Сравнивая результаты по режимам 1 – 18 и 55 – 72, можно отметить значительную разницу между максимальными температурами на поверхности катания колеса при торможении чугунной и композиционной тормозной колодкой. Исходя из полученных результатов, разница между максимальными температурами в точке T0 для порожних режимов составляет порядка 30°C, средних – 100...105°C, груженых – около 140°C. В дальнейшем в течение времени торможения разница между температурами последующих точек T1 – T5 для рассматриваемых типов колодок становится менее значительной. Так, разница между максимальными температурами в точке T1 для порожних режимов составляет 5...6°C, средних – 6...8°C, груженых – 80°C. Далее в точке T2 для порожних и средних режимов разница между температурами становится практически незаметной, а для груженого режима составляет 12°C. В точках T3, T4, T5 разница между температурами в груженых режимах составляет 17°C, 0,3°C, 1°C соответственно.

3.1.7 Влияние продолжительности торможения

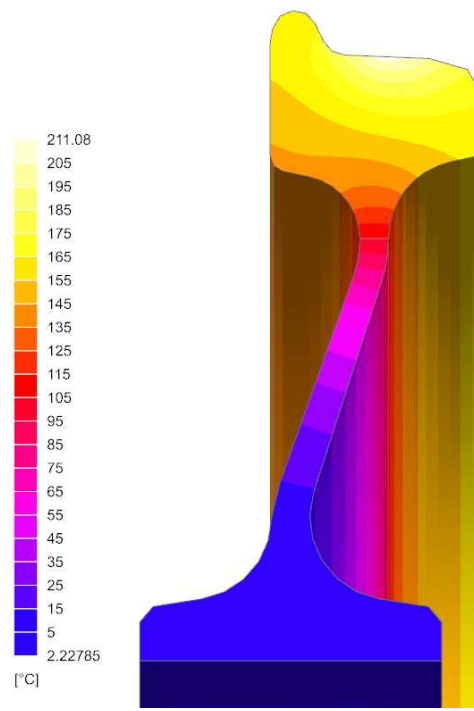
Влияние продолжительности торможения на нагрев колеса оценим на режимах 73 – 84. Исследование проводится при скоростях 10...40 км/ч с шагом 10 км/ч при различных режимах воздухораспределителя на неизношенном колесе и температуре воздуха 0°C. Длительность торможения во всех рассматриваемых режимах принимается равной 1200 с. Композиционная тормозная колодка считается прижатой к колесу с постоянной силой в течение всего времени моделирования. В действительности рассматриваемые режимы в некотором роде соответствуют поддержанию поездом постоянной скорости на длительном спуске.

Результаты расчета приведены на рисунке 3.7 в виде картин распределения температур по сечению колеса в момент окончания торможения.

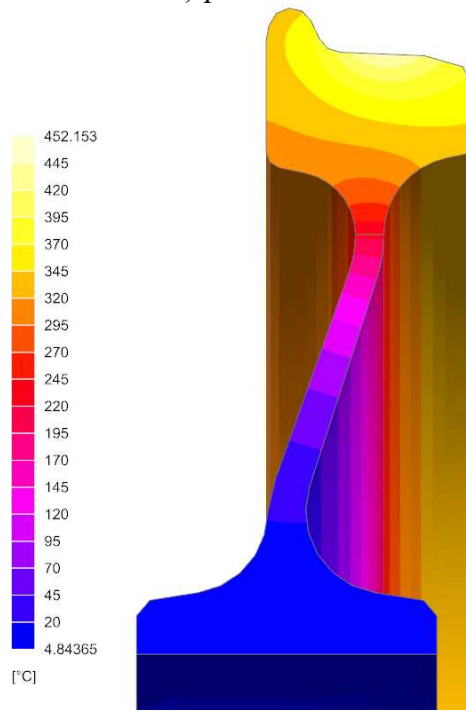




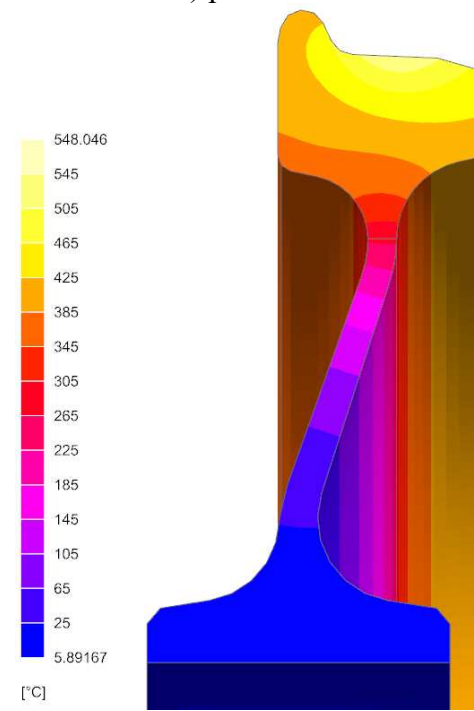
в) режим 75



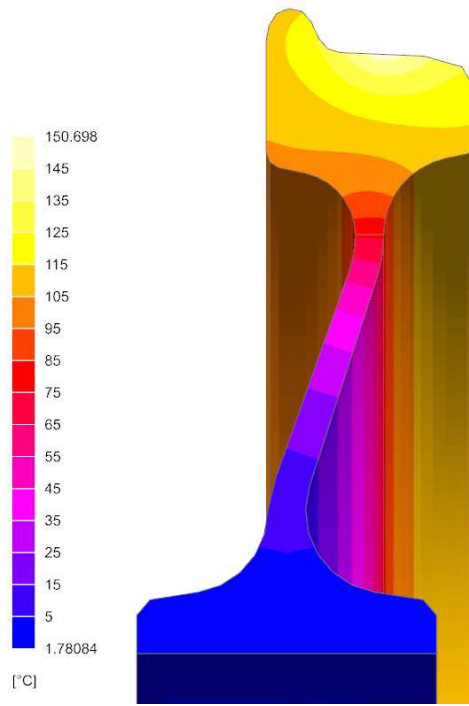
г) режим 76



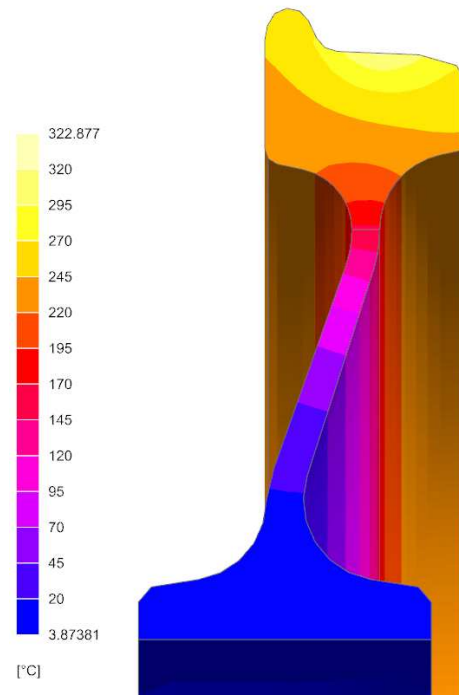
д) режим 77



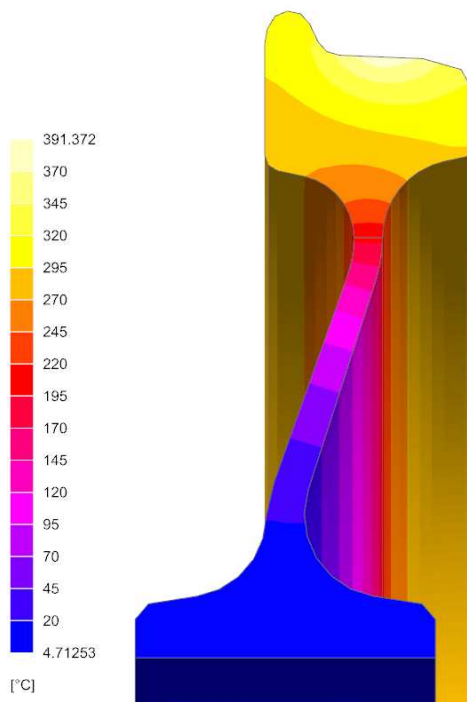
е) режим 78



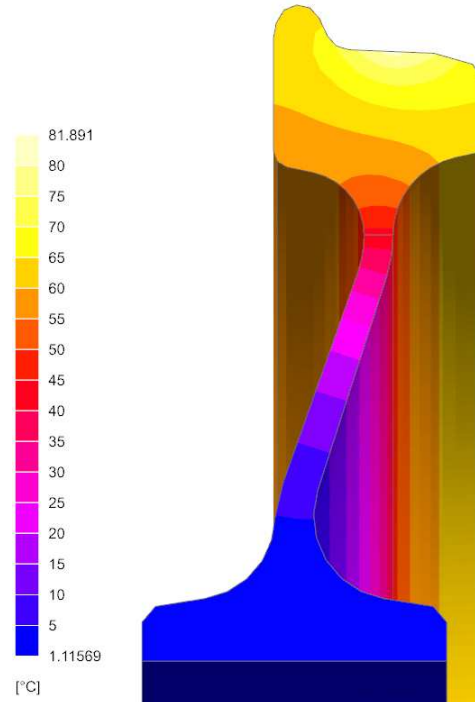
ж) режим 79



з) режим 80



и) режим 81



к) режим 82

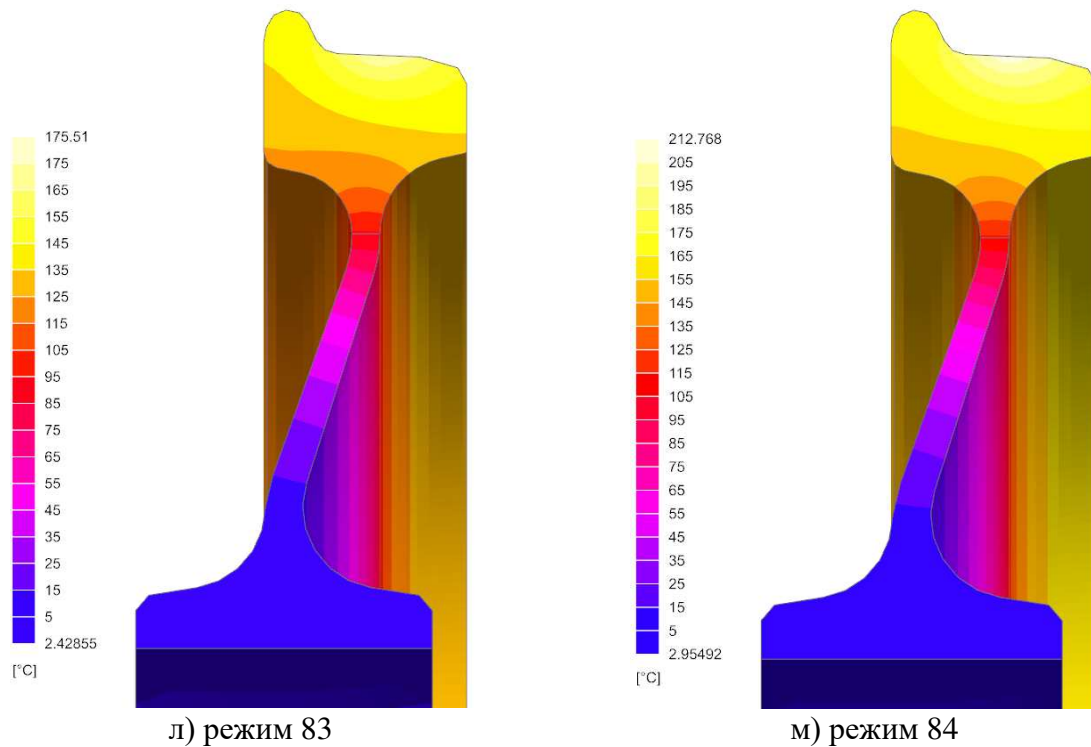


Рисунок 3.7 – Картины распределения температур по сечению цельнокатанного колеса в момент окончания торможения режимах 73 – 84

Как видно из рисунка 3.7, в длительных режимах торможения (1200 с) колесо прогревается практически по всему объему, а изменение температуры происходит даже в районе ступицы колеса. Ожидаемо наибольшему нагреву колесо подвергается при высоких скоростях торможения и большой загрузке вагона. Среди рассмотренных режимов наибольшая температура поверхности катания колеса достигнута в режиме 75 (688°C), минимальная – в режиме 82 (81°C).

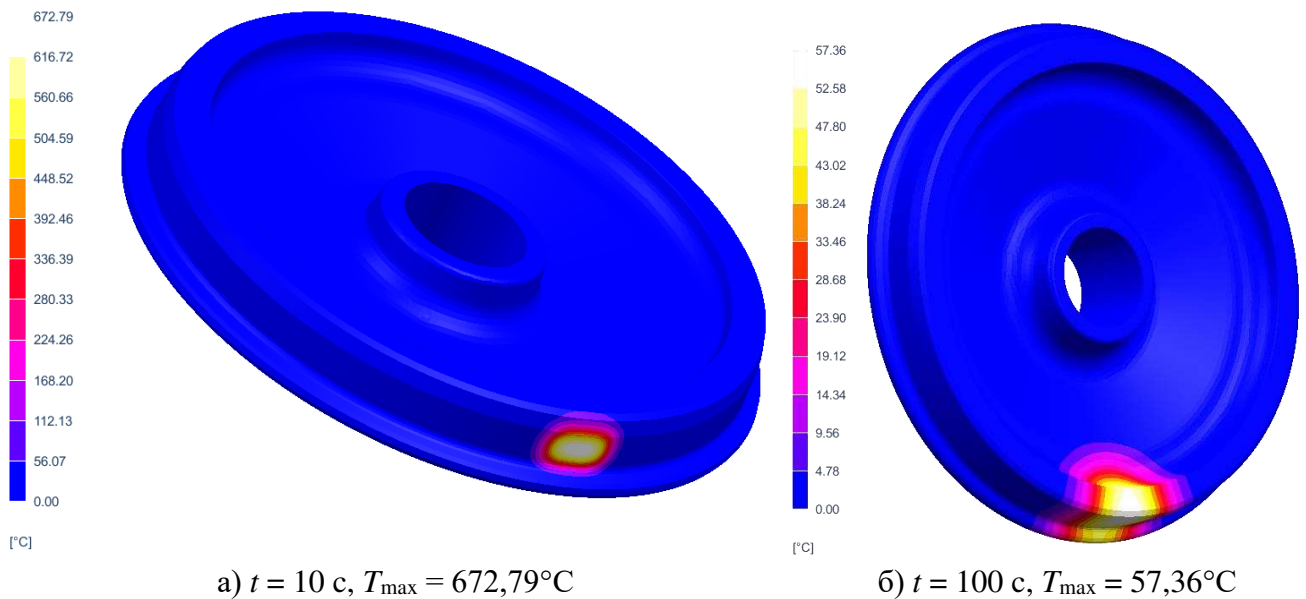
Рассматривая динамику нагрева колеса в длительных режимах, отметим практически линейный характер роста температуры. Незначительная нелинейность, выраженная относительно резким ростом температуры, наблюдается лишь в начальный период торможения от 0 до 100 с. В дальнейшем по мере нагревания с каждым оборотом колеса скорость роста температуры выравнивается и не имеет наблюдаемых в начальный период торможения градиентов.

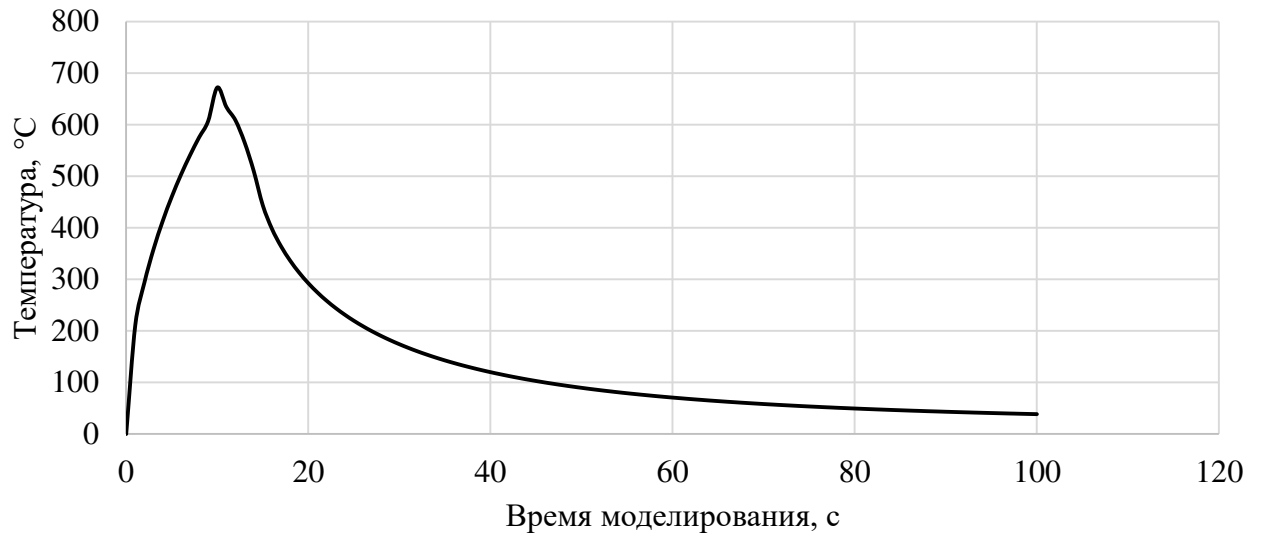
Оценивая полученные результаты, необходимо отметить, что при длительных режимах разница между максимальной и минимальной температурой в колесе может достигать очень высоких значений в зависимости от скорости и загрузки ва-

гона. Подобные разницы в температурах, продемонстрированные в рассматриваемых режимах, неминуемо приведут к значительным деформациям колеса и возможным структурным изменениям его материала. Данный вопрос также представляет определенный научный и практический интерес, однако в рамках настоящей работы не рассматривается.

3.1.8 Моделирование нагрева заклиненного колеса

Моделирование проводилось в предположении кратковременного заклинивания колеса в течение 10 с при относительно невысокой скорости движения вагона (1 м/с) и последующего остывания в течение 90 с. Таким образом, общее время моделирования составило 100 с. Результаты моделирования в виде картин распределения температур в момент достижения колесом максимальной температуры и окончания моделирования, а также график изменения максимальных температур колеса приведены на рисунке 3.8.





в) график изменения максимальных температур в ободу колеса при заклинивании

Рисунок 3.8 – Результаты моделирования нагрева колеса при его заклинивании

Как видно из рисунка 3.8, максимальные температуры колеса при юзе по рельсу могут достигать 670°C . Анализ картин распределения температур показывает, что локализация нагретой части колеса вокруг непосредственной площадки контакта между колесом и рельсом имеет относительно небольшой размер, что приведет к затруднениям при попытках осуществления теплового контроля с целью обнаружения заклиненных колесных пар.

3.2 Компьютерное моделирование определения траектории сканирования и
вычисления уровня сигнала ИК-излучения при тепловом контроле
колодочных тормозов

Предлагается рассмотреть четыре варианта ориентации приемника ИК-излучения на колесо – при расположении приемника с внутренней или внешней стороны колеса и ориентацией на ступицу или обод колеса. Общий вид предлагаемых вариантов ориентации приемника приведен на рисунке 3.9.

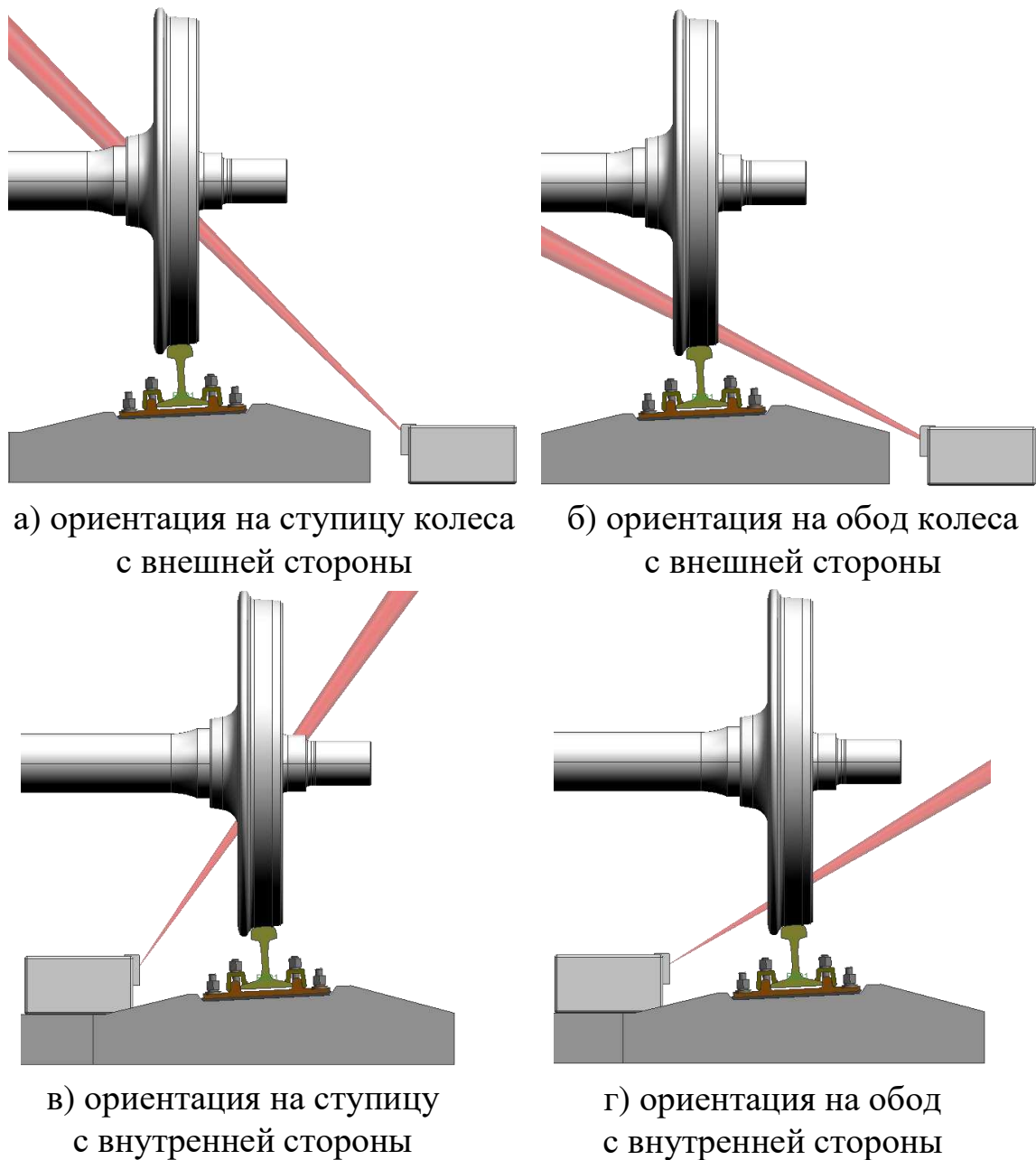


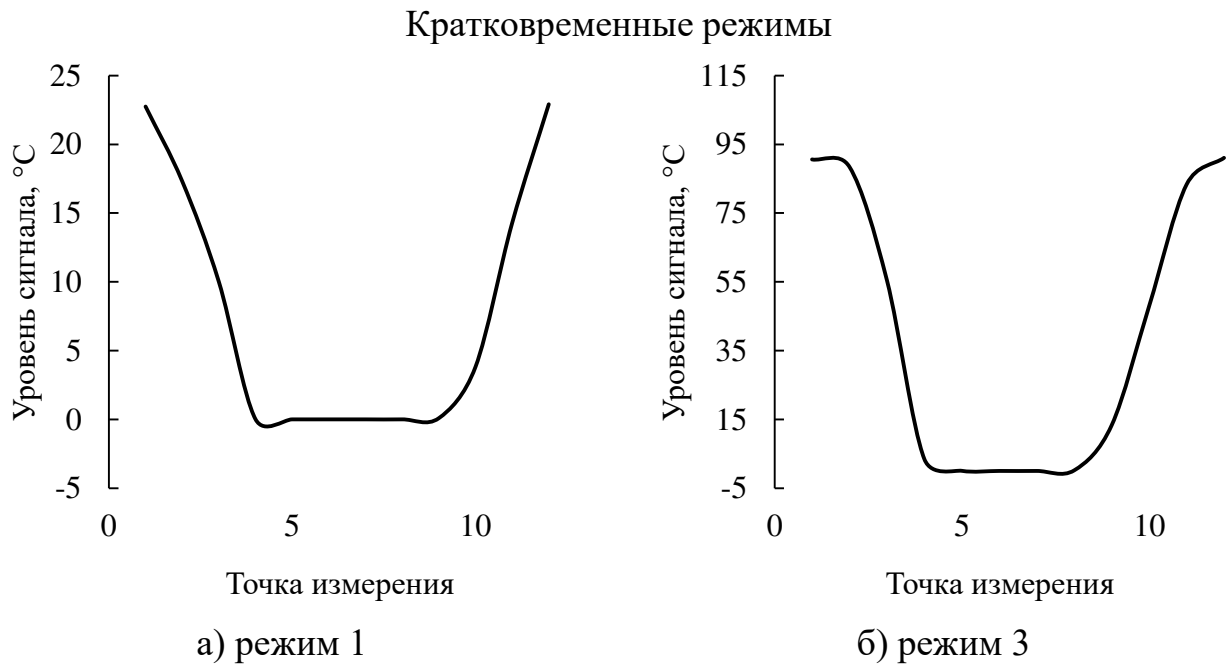
Рисунок 3.9 – Варианты ориентации приемника ИК-излучения для осуществления
теплового контроля колодочных тормозов

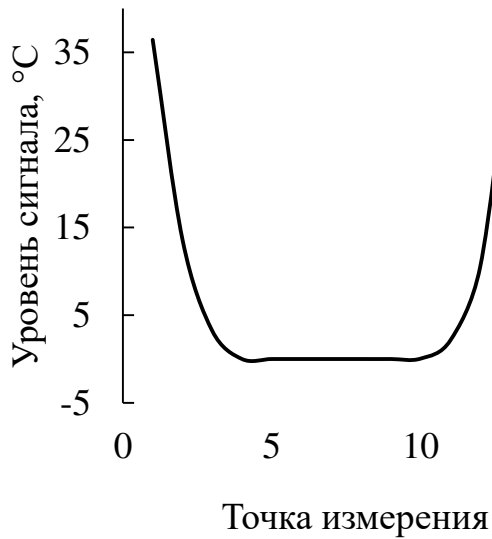
Для каждого из приведенных вариантов получены осциллограммы изменения сигнала, принимаемого ИК-оптикой СТК, по рассчитанным в п. 3 режимам торможения. Анализ полученных данных показал, что форма сигнала, в отличие от его уровня, слабо зависит от режима воздухораспределителя. Основное влияние на форму сигнала оказывает продолжительность торможения, используемый тип колески, ориентация оптики. В связи с этим предлагается рассмотреть полученные сигналы в наиболее показательных кратковременных режимах торможения, когда торможение происходит с высоких скоростей на порожних и груженных режимах воздухораспределителя, а также длительные режимы для сравнительного анализа. Выборка режимов представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Выборка режимов для проведения анализа осциллограмм изменения сигнала, принимаемого ИК-оптикой СТК

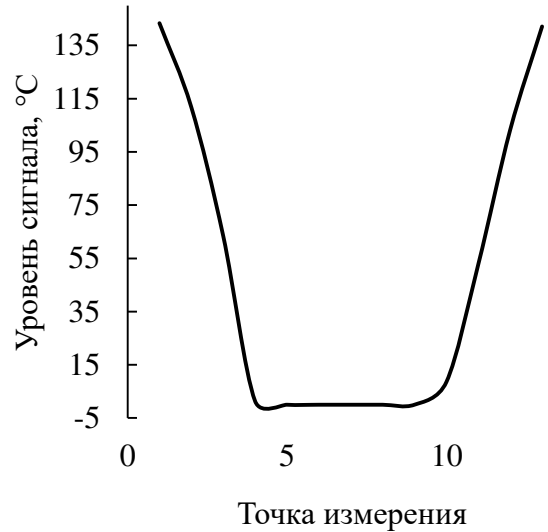
Тип режимов	Номера режимов
Кратковременные	1, 3, 55, 57
Длительные	76, 78

На рисунке 3.10 приведены осциллограммы изменения сигнала при сканировании колеса в указанных режимах и ориентации ИК-оптики согласно варианту *a* на рисунке 3.9.



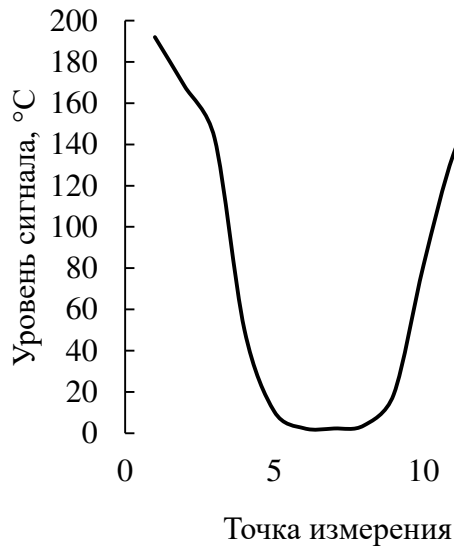


ж) режим 55

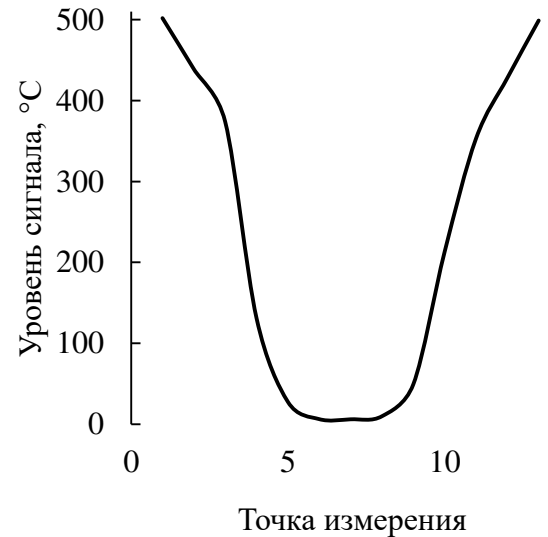


и) режим 57

Длительные режимы



м) режим 76



н) режим 78

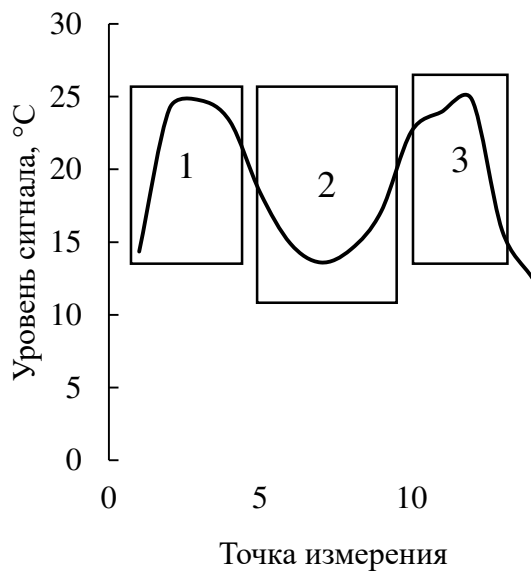
Рисунок 3.10 – Осциллограммы сигнала, получаемого приемником ИК-излучения при его ориентации на ступицу колеса с внешней стороны

Как видно из рисунка 3.10, полученные осциллограммы сигналов в целом имеют параболическую форму. Для кратковременных режимов торможения при этом характерно появление широкой «плоской» зоны между ветвями параболы, которая соответствует моментам прохождения дисковой частью колеса сканирующего луча. В грузеных режимах на осциллограммах можно отметить наличие «площадок», соответствующих началу сканирования колеса (зоны гребня и поверхности катания). Анализ полноразмерных картин теплового состояния колеса в этих

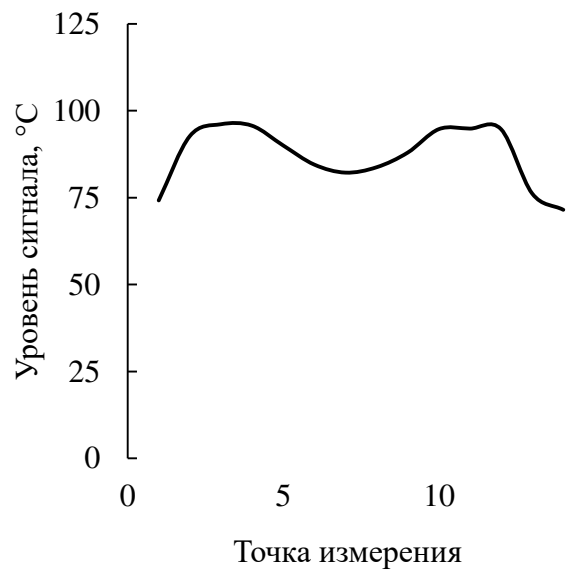
режимах в момент сканирования показывает, что возникновение «площадки» обусловлено большей длительностью процесса торможения и лучшим прогревом материала колеса по сечению вследствие явления теплопроводности. В длительных режимах торможения форма сигнала стремится к классической параболической форме с более плавным достижением экстремума в нижней части, что, очевидно, обусловлено значительно более интенсивным прогревом колеса по всему сечению.

Рассмотрим осциллограммы изменения сигналов при ориентации ИК-оптики согласно рисунку 3.9, б на обод колеса с внешней его стороны (рисунок 3.11).

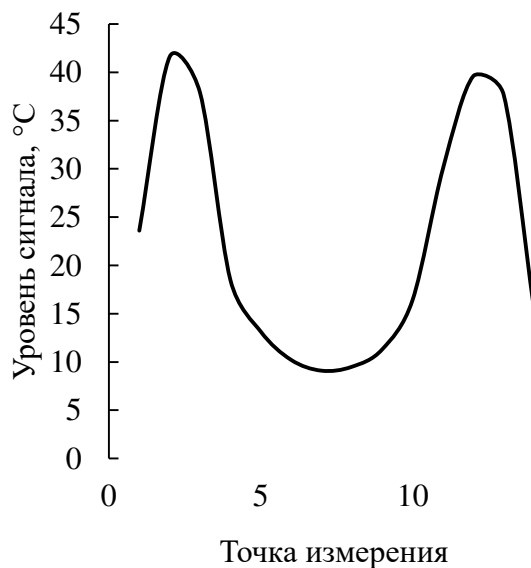
Кратковременные режимы



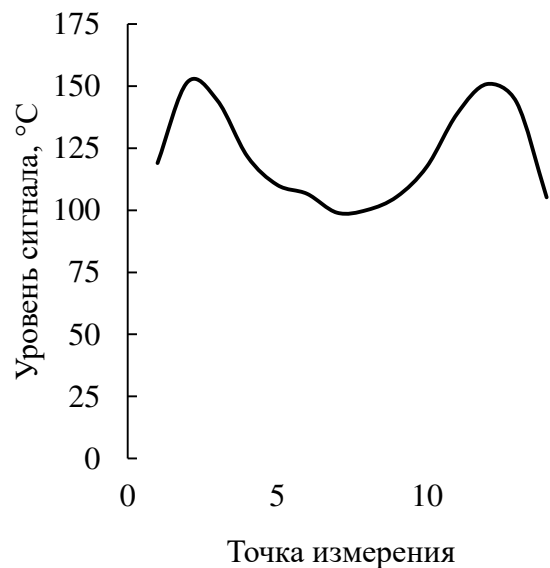
а) режим 1



б) режим 3

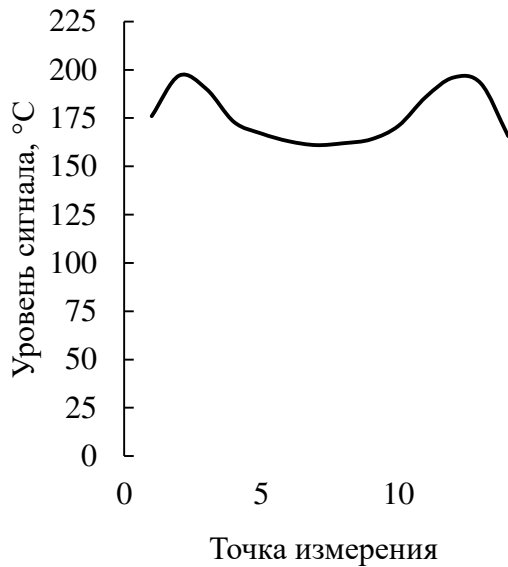


в) режим 55

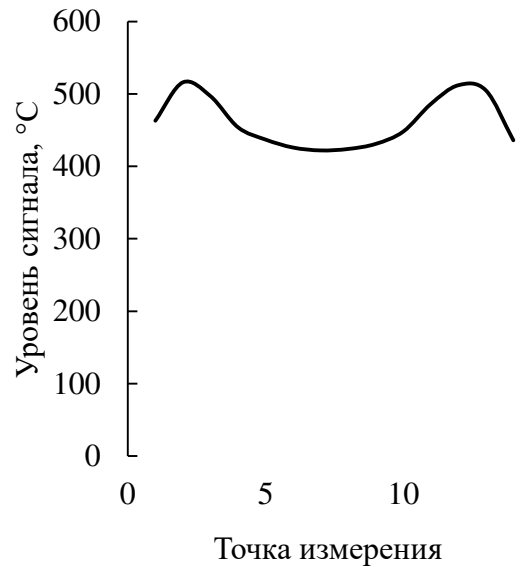


г) режим 57

Длительные режимы



д) режим 76



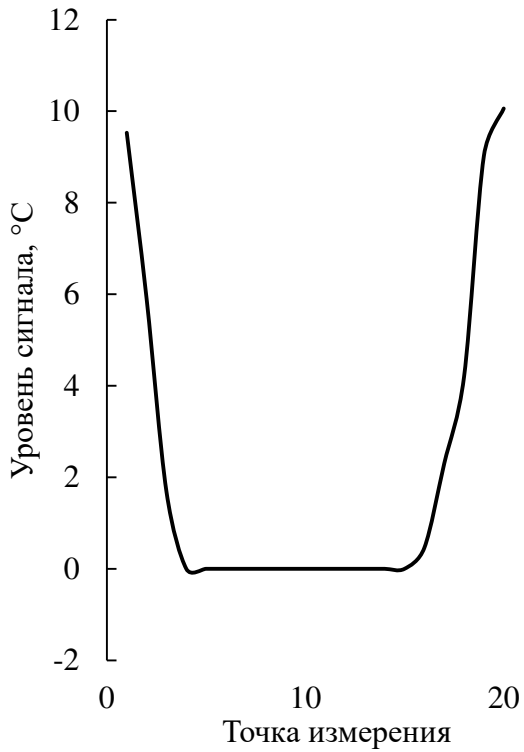
е) режим 78

Рисунок 3.11 – Осциллограммы сигнала, получаемого приемником ИК-излучения при его ориентации на обод колеса с внешней стороны

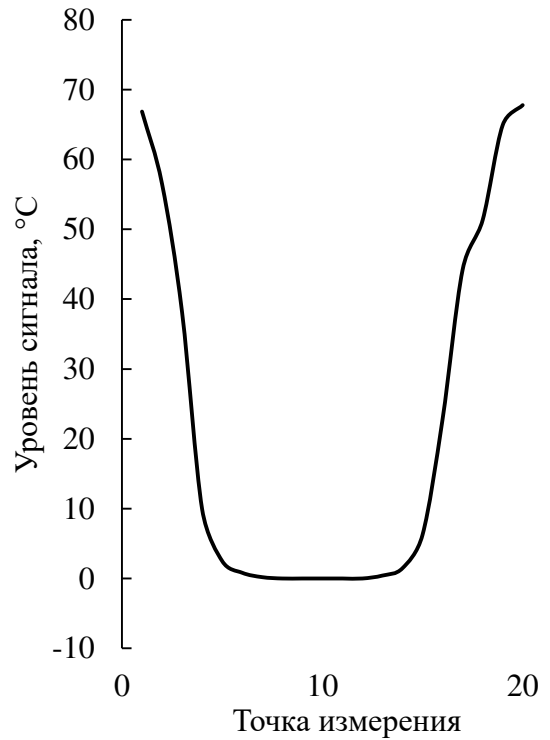
Как видно из рисунка 3.11, у всех сигналов при подобной ориентации ИК-оптики можно отметить несколько характерных зон. Для удобства анализа отметим эти зоны на рисунке 3.11, а. Зона 1 показывает прохождение сканирующим лучом участка от гребня (первые точки сигнала) к поверхности катания. В кратковременных режимах торможения регистрируемая разница температур между гребнем и поверхностью катания выше, чем при длительных режимах, и имеет ярко выраженный градиент с быстро достигаемым экстремумом. Анализ приведенных графиков также показывает, что при использовании композиционных тормозных колодок эта разница еще больше, а максимум температуры достигается значительно быстрее, чем при использовании чугунных колодок. Зона 2 иллюстрирует прохождение сканирующим лучом боковой поверхности обода колеса, температура которой несколько ниже температуры поверхности катания колеса. При использовании композиционных колодок разница между максимальным уровнем сигнала в зоне 1 и минимальным уровнем сигнала в зоне 2 на несколько порядков превосходит аналогичный показатель при использовании чугунных колодок. Зона 3 в некоторой степени является зеркальным отражением зоны 1 и показывает прохождение сканирующим лучом участка колеса от обода к гребню через поверхность катания.

На рисунке 3.12 приведены осциллограммы изменения сигнала при ориентации ИК-оптики на ступицу колеса с его внутренней стороны согласно варианту в на рисунке 3.9.

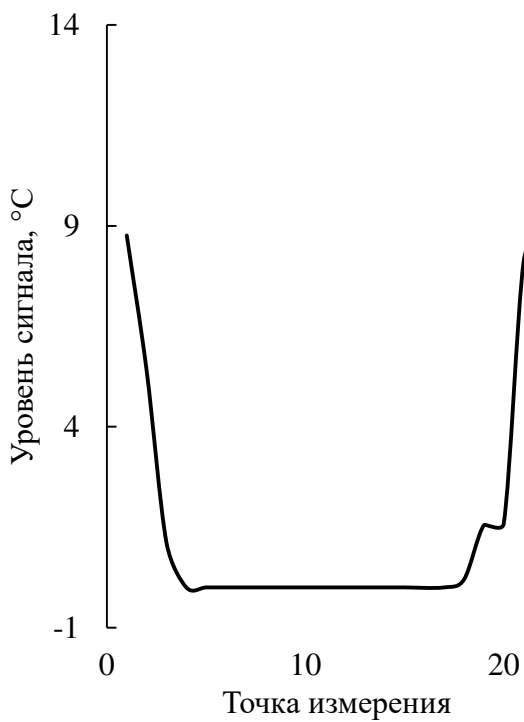
Кратковременные режимы



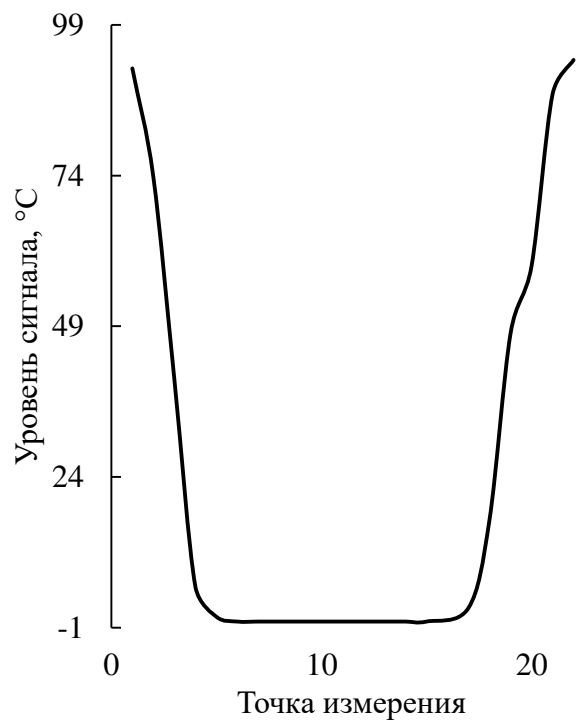
а) режим 1



б) режим 3



в) режим 55



г) режим 57

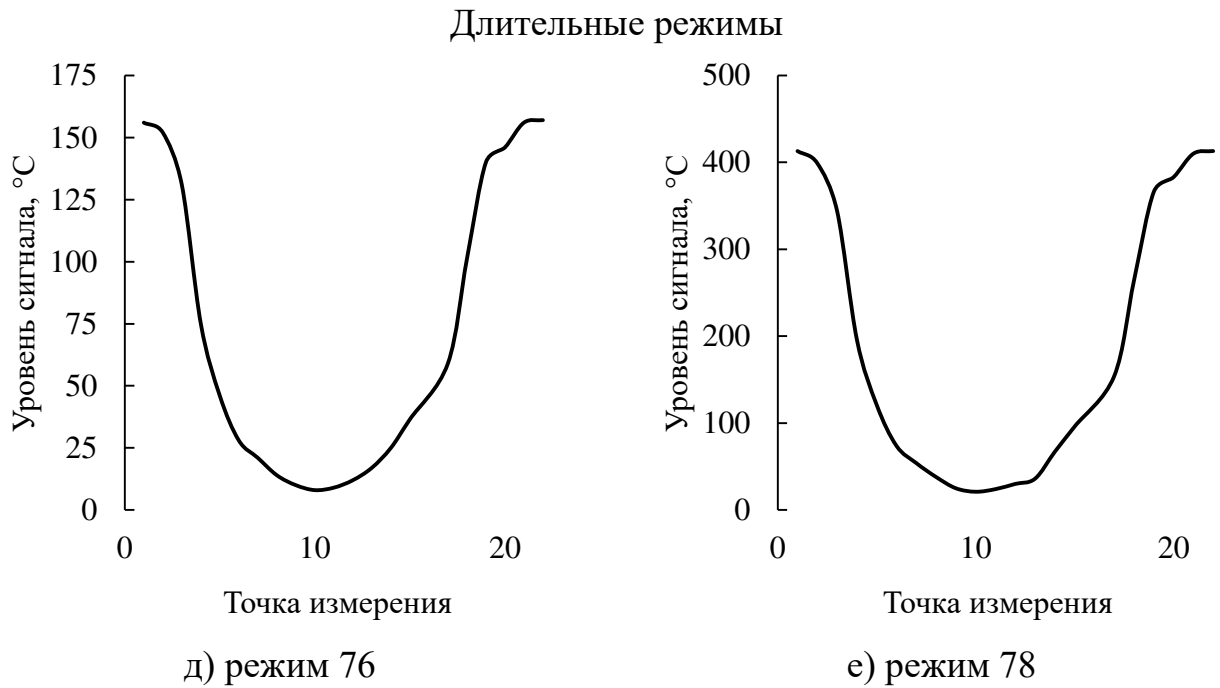
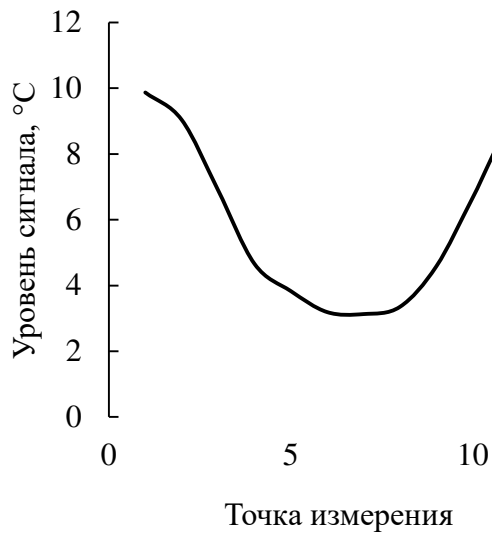


Рисунок 3.12 – Осциллограммы сигнала, получаемого приемником ИК-излучения при его ориентации на ступицу колеса с внутренней стороны

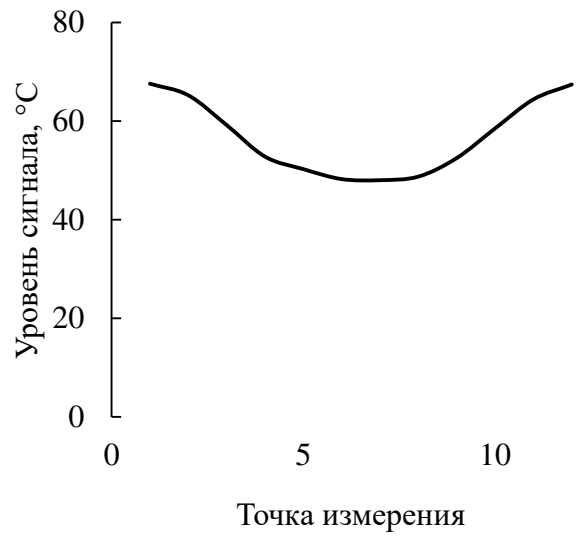
Сравнение результатов моделирования на рисунках 3.10 и 3.12 показывает, что при ориентации ИК-оптики на ступицу колеса с его внутренней стороны регистрируемая аппаратурой температура значительно ниже, чем при расположении оптики с внешней стороны колеса. Это, очевидно, обусловлено попаданием в зону контроля поверхности катания колеса, подвергающейся наиболее интенсивному нагреву при торможении. Отметим, что величина разницы в уровне сигналов имеет зависимость от продолжительности торможения – с ростом длительности торможения разница в получаемых сигналах также растет. Форма получаемых сигналов при сравниваемых вариантах ориентации ИК-оптики можно считать приблизительно одинаковой за исключением локальных отклонений при переходах от обода к дисковой части колеса и наоборот, обусловленных различной формой сканируемых поверхностей.

Осциллограммы изменения сигнала при ориентации ИК-оптики на обод колеса с его внутренней стороны согласно варианту 2 на рисунке 3.9 приведены ниже (рисунок 3.13).

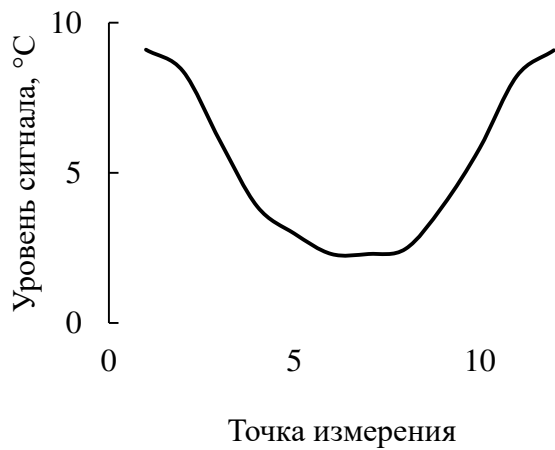
Кратковременные режимы



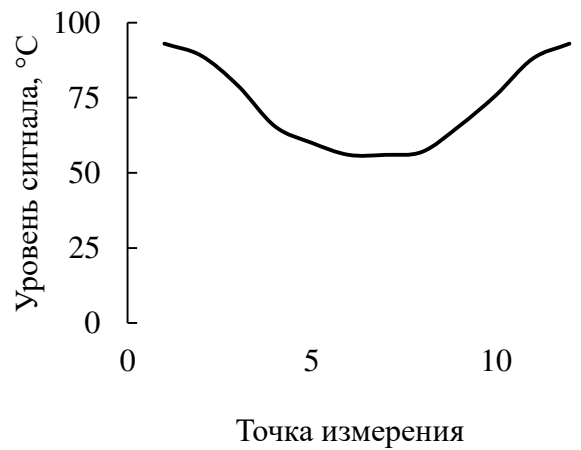
а) режим 1



б) режим 3

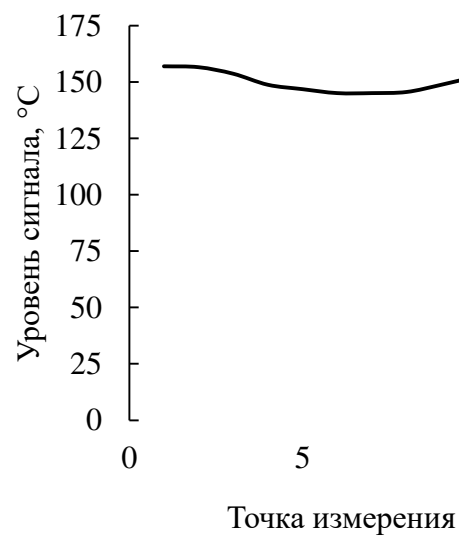


в) режим 55

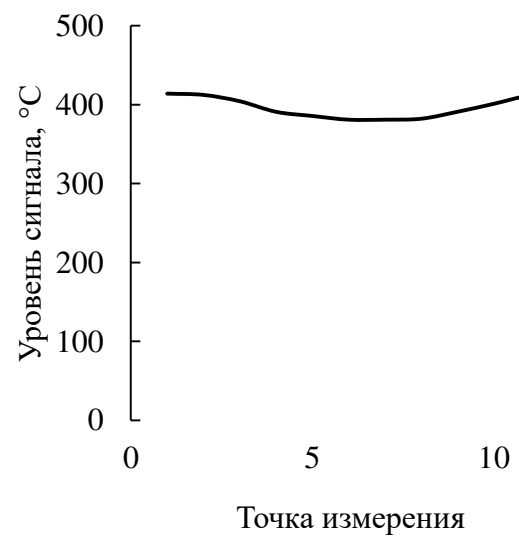


г) режим 57

Длительные режимы



д) режим 76



е) режим 78

Рисунок 3.13 – Осциллограммы сигнала, получаемого приемником ИК-излучения при его ориентации на обод колеса с внутренней стороны

Анализ динамических картин прохождения колесной парой участка контроля и графиков на рисунке 3.13 показывает, что в зону контроля при принятой ориентации ИК-оптики попадает только боковая поверхность обода колеса. Этим обусловлена их приближенность к параболической форме и отсутствие дополнительных экстремумов, как на рисунке 3.11, обусловленных попаданием в зону контроля поверхности катания. Оценивая приведенные графики, заметим также, что они имеют незначительные отклонения между минимальным и максимальным уровнями принимаемых сигналов. При этом, как и в случае ориентации на ступицу, разница между регистрируемым уровнем температур с внутренней стороны обода значительно ниже, чем при ориентации с внешней.

Обобщенный анализ приведенных результатов моделирования вычисления уровня сигнала, принимаемого ИК-оптикой СТК, показывает, что при ориентации оптики на колеса с внешней стороны в зону контроля попадает поверхность катания колеса. В этой части подобная ориентация оптики видится наиболее информативной, поскольку позволяет определить максимальную температуру колеса. Несмотря на это, необходимо также учитывать тот факт, что при реализации режима экстренного торможения возможно резкое кратковременное повышение температуры поверхности катания колеса, что не отражает адекватной картины работы тормозного узла. В таких случаях возможно ложное срабатывание СТК. Ориентация ИК-оптики на колесо с его внутренней стороны позволяет исключить возможное ложное срабатывание СТК при экстренном торможении поезда, а также получить приблизительное представление о максимальной температуре поверхности катания колеса на основании температуры гребня.

Обнаружение заклиненного колеса средствами бесконтактного теплового контроля при использовании приемников и их ориентации согласно рассмотренным в этом пункте является весьма затруднительным. Это обусловлено бесконечным числом вариантов прохождения колеса зоны сканирования и, как следствие, низкой вероятностью попадания нагретой площадки в зону контроля, а также очень быстрым остыванием колеса после заклинивания до температуры окружающей среды. Обнаружение подобных тепловых аномалий возможно с использованием

многоэлементных СТК, которые при сканировании создают инфракрасный образ контролируемого объекта. По локализации нагрева колеса вокруг определенной площадки, как на рисунке 3.8, возможно сделать заключение об обнаружении колеса, подвергшегося заклиниванию.

3.3 Мониторинг нагрева колёс в эксплуатационных условиях, натурные испытания экспериментальной системы теплового контроля колодочных тормозов и статистический анализ полученных данных

Мониторинг нагрева колёс и натурные испытания экспериментальной СТК колодочных тормозов проводились ООО «Инфотэкс АТ» при непосредственном участии автора в мае-августе 2018 года на экспериментальном участке Исток Свердловской железной дороги с целью:

- мониторинга нагрева колёс в реальных условиях эксплуатации;
- оценки различных вариантов ориентации ИК-оптики и применения разных видов приемников ИК-излучения (болометрических и фотонных);
- оценки достоверности комплексной диагностической модели теплового контроля колёс.

Осуществлялся мониторинг нагрева колёс с использованием различных аппаратных средств для регистрации температуры колёс:

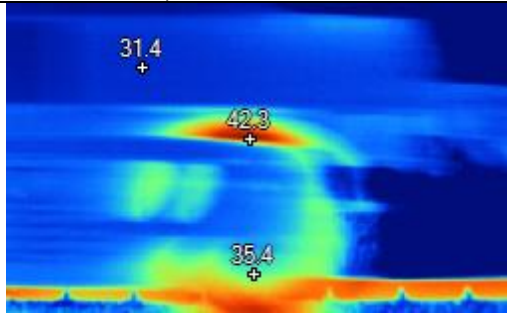
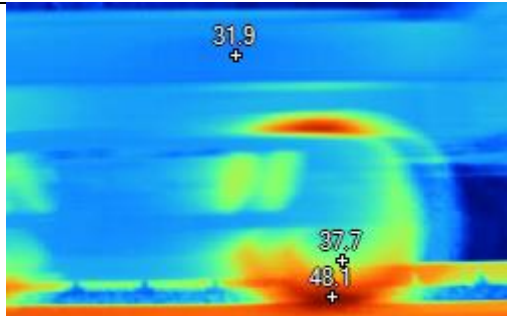
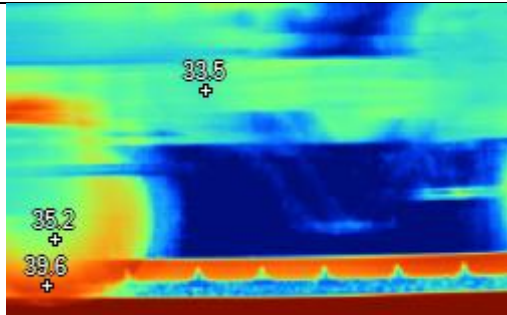
- тепловизора Fluke Ti450 с диапазоном измеряемых значений температуры от минус 20°C до плюс 1200°C и погрешностью измерений $\pm 2^\circ\text{C}$;
- экспериментального комплекта СТК колодочных тормозов с различными вариантами ориентации ИК-оптики с кодовыми названиями Т45 и ТИ05.

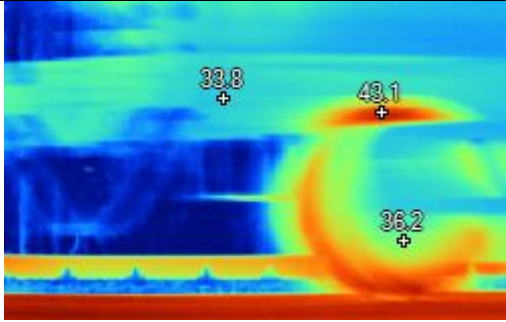
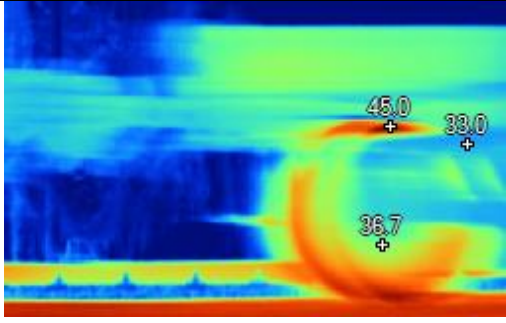
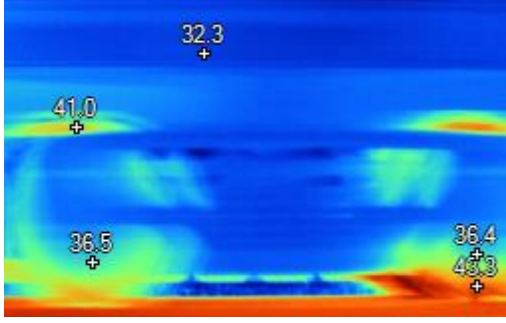
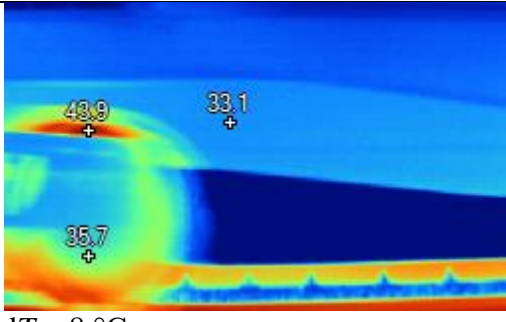
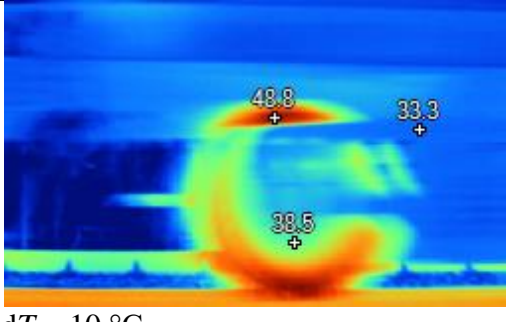
Т45 – камера с фотонным приемником на основе селенида свинца PbSe. Камера размещается внутри пути и ориентируется на контролируемое колесо под углом 45° на высоту 150 мм от уровня головки рельса. Чувствительность в спектральном диапазоне от 1 мкм до 5,5 мкм.

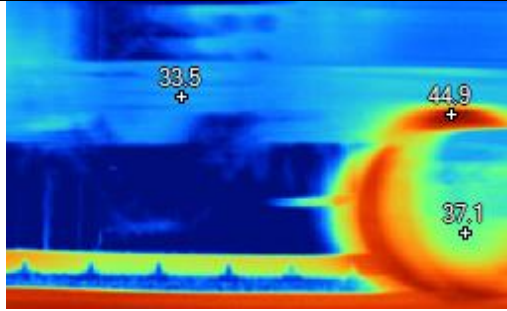
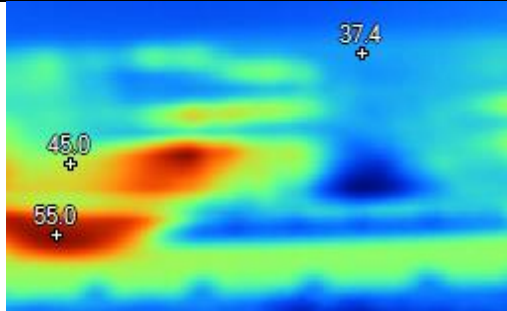
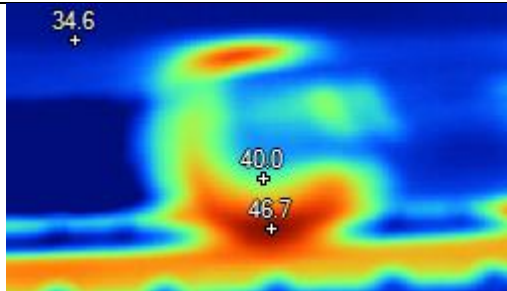
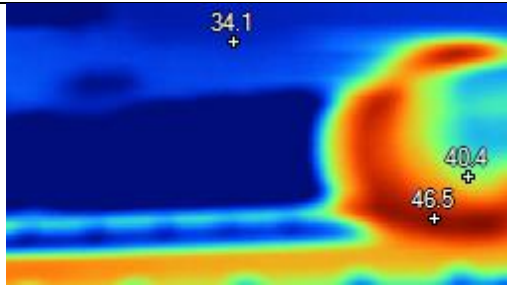
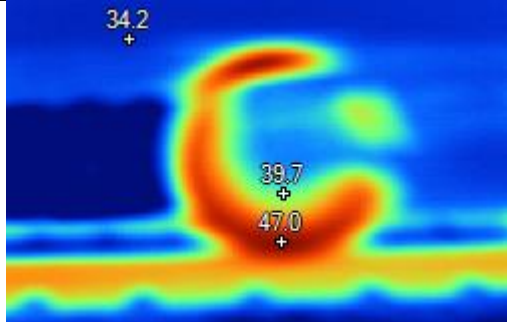
ТИ05 – камера с болометрическим приемником, размещаемая снаружи пути и ориентированная на ступицу колеса под углом 55°. Соответствует рассмотренному в п. 3.2 варианту ориентации ИК-оптики на рисунке 3.9, а.

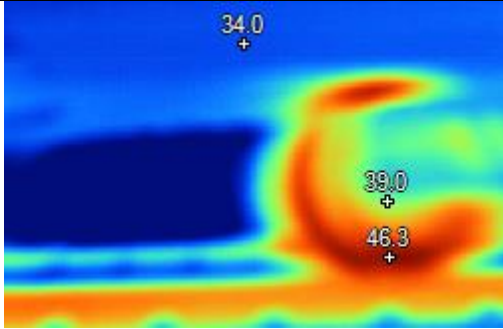
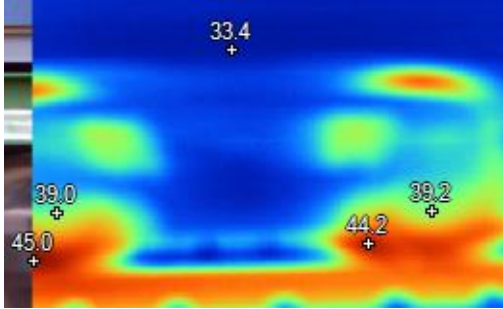
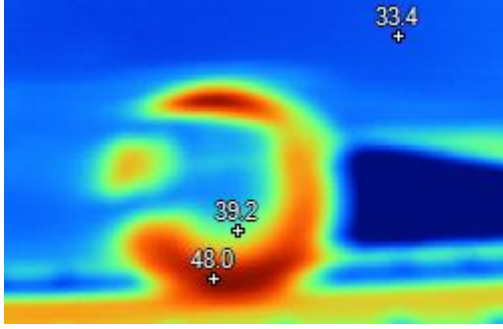
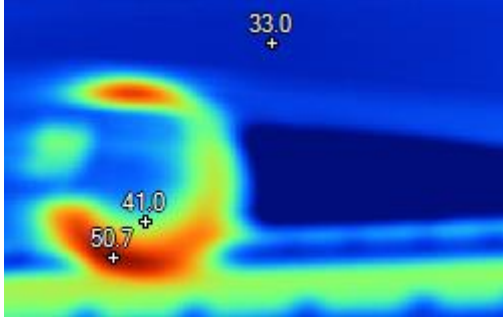
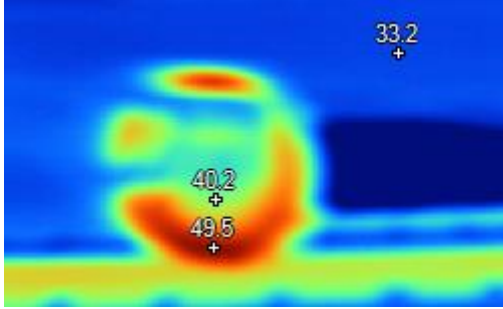
С целью оценки достоверности измерений и сравнения показаний, получаемых СТК с различной ориентацией ИК-оптики, проведена тепловизионная съёмка колёс грузового подвижного состава при прохождении участка железной дороги на экспериментальном полигоне Исток. Тепловизионная съёмка производилась 13 августа 2018 года. Температура окружающего воздуха регистрировалась при помощи датчика температуры наружного воздуха на посту контроля и на момент проведения съёмок составила 26°C. Проведен контроль двух грузовых поездов, после которого произведена сверка с показаниями СТК. Результаты проведенного мониторинга представлены в таблице 3.4.

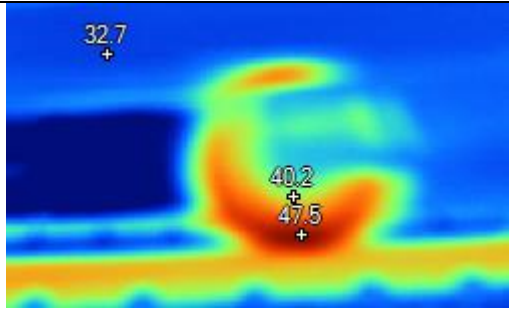
Таблица 3.4 – Сравнение показаний СТК с различными вариантами ориентации инфракрасной оптики с результатами съёмки тепловизором Fluke Ti450

№ п.е / № к.п	Тепловое изображение	Показания СТК	
		ТИ05	T45
13.08, 14:16 (МСК), схема 2+65, № п/п 111, T_{нв} = 26°C, ϑ = 32 – 42 км/ч			
06 п.е., 1 кп	 <p>dT = 7 °C</p>	$T_{\max} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min} = 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT = 7 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\max} = 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min} = 26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT = 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$
11 п.е., 1 кп	 <p>dT = 10 °C</p>	$T_{\max} = 47 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min} = 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT = 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\max} = 38 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min} = 26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$
18 п.е., 1 кп	 <p>dT = 4 °C</p>	$T_{\max} = 37 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min} = 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\max} = 31 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min} = 26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

№ п.е / № к.п	Тепловое изображение	Показания СТК	
		ТИ05	T45
23 п.е., 4 кп	 <p>$dT = 7\text{ °C}$</p>	$T_{\max} = 41\text{ °C}$ $T_{\min} = 33\text{ °C}$ $dT = 8\text{ °C}$	$T_{\max} = 34\text{ °C}$ $T_{\min} = 26\text{ °C}$ $dT = 8\text{ °C}$
27 п.е., 4 кп	 <p>$dT = 10\text{ °C}$</p>	$T_{\max} = 43\text{ °C}$ $T_{\min} = 33\text{ °C}$ $dT = 10\text{ °C}$	$T_{\max} = 36\text{ °C}$ $T_{\min} = 28\text{ °C}$ $dT = 8\text{ °C}$
29 п.е., 3 и 4 кп	 <p>$dT_3 = 7\text{ °C}$ $dT_4 = 5\text{ °C}$</p>	$T_{\max 3} = 39\text{ °C}$ $T_{\min 3} = 32\text{ °C}$ $dT_3 = 7\text{ °C}$ $T_{\max 4} = 39\text{ °C}$ $T_{\min 4} = 32\text{ °C}$ $dT_4 = 7\text{ °C}$	$T_{\max 3} = 33\text{ °C}$ $T_{\min 3} = 26\text{ °C}$ $dT_3 = 7\text{ °C}$ $T_{\max 4} = 31\text{ °C}$ $T_{\min 4} = 26\text{ °C}$ $dT_4 = 5\text{ °C}$
34 п.е., 3 кп	 <p>$dT = 8\text{ °C}$</p>	$T_{\max} = 41\text{ °C}$ $T_{\min} = 32\text{ °C}$ $dT = 9\text{ °C}$	$T_{\max} = 33\text{ °C}$ $T_{\min} = 26\text{ °C}$ $dT = 7\text{ °C}$
41 п.е., 4 кп	 <p>$dT = 10\text{ °C}$</p>	$T_{\max} = 45\text{ °C}$ $T_{\min} = 35\text{ °C}$ $dT = 10\text{ °C}$	$T_{\max} = 36\text{ °C}$ $T_{\min} = 26\text{ °C}$ $dT = 10\text{ °C}$

№ п.е / № к.п	Тепловое изображение	Показания СТК	
		ТИ05	T45
43 п.е., 4 кп	 <p>$dT = 8\text{ °C}$</p>	$T_{\max} = 42\text{ °C}$ $T_{\min} = 34\text{ °C}$ $dT = 8\text{ °C}$	$T_{\max} = 36\text{ °C}$ $T_{\min} = 26\text{ °C}$ $dT = 10\text{ °C}$
13.08, 14:33 (МСК), схема 2+42, № п/п 112, $T_{\text{нв}} = 26\text{ °C}$, $\vartheta = 38 - 30\text{ км/ч}$			
01 п.е., 2 кп	 <p>$dT = 10\text{ °C}$</p>	$T_{\max} = 54\text{ °C}$ $T_{\min} = 41\text{ °C}$ $dT = 13\text{ °C}$	$T_{\max} = 65\text{ °C}$ $T_{\min} = 35\text{ °C}$ $dT = 30\text{ °C}$
11 п.е., 4 кп	 <p>$dT = 7\text{ °C}$</p>	$T_{\max} = 43\text{ °C}$ $T_{\min} = 37\text{ °C}$ $dT = 6\text{ °C}$	$T_{\max} = 36\text{ °C}$ $T_{\min} = 29\text{ °C}$ $dT = 7\text{ °C}$
19 п.е., 4 кп	 <p>$dT = 6\text{ °C}$</p>	$T_{\max} = 42\text{ °C}$ $T_{\min} = 36\text{ °C}$ $dT = 6\text{ °C}$	$T_{\max} = 36\text{ °C}$ $T_{\min} = 29\text{ °C}$ $dT = 7\text{ °C}$
21 п.е., 4 кп	 <p>$dT = 7\text{ °C}$</p>	$T_{\max} = 44\text{ °C}$ $T_{\min} = 36\text{ °C}$ $dT = 8\text{ °C}$	$T_{\max} = 36\text{ °C}$ $T_{\min} = 29\text{ °C}$ $dT = 7\text{ °C}$

№ п.е / № к.п	Тепловое изображение	Показания СТК	
		ТИ05	T45
23 п.е., 4 кп	 <p>$dT = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$</p>	$T_{\max} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min} = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\max} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min} = 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$
28 п.е., 3-4 кп	 <p>$dT_3 = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT_4 = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$</p>	$T_{\max 3} = 41\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min 3} = 36\text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT_3 = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\max 4} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min 4} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT_4 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\max 3} = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min 3} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT_3 = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\max 4} = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min 4} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT_4 = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$
37 п.е., 3 кп	 <p>$dT = 9\text{ }^{\circ}\text{C}$</p>	$T_{\max} = 48\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min} = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\max} = 39\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min} = 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
40 п.е., 3 кп	 <p>$dT = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$</p>	$T_{\max} = 48\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min} = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\max} = 39\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min} = 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT = 11\text{ }^{\circ}\text{C}$
42 п.е., 3 кп	 <p>$dT = 9\text{ }^{\circ}\text{C}$</p>	$T_{\max} = 47\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min} = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\max} = 39\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\min} = 31\text{ }^{\circ}\text{C}$ $dT = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$

№ п.е / № к.п	Тепловое изображение	Показания СТК	
		ТИ05	T45
44 п.е., 4 кп	 <p>$dT = 7\text{ °C}$</p>	$T_{\max} = 44\text{ °C}$ $T_{\min} = 36\text{ °C}$ $dT = 8\text{ °C}$	$T_{\max} = 36\text{ °C}$ $T_{\min} = 29\text{ °C}$ $dT = 7\text{ °C}$

Анализ данных в таблице 3.4 показывает, что в среднем разница максимальных регистрируемых температур оборудованием ТИ05 и Т45 составляет 8...12°C. При этом анализ тепловизионных изображений показывает, что наиболее точными в плане определения максимальной температуры колеса являются измерения, производимые аппаратурой ТИ05. Как видно из приведенных тепловизионных изображений и результатов теплового контроля, разница между температурами окружающей среды и колёс сравнительно невелика. Это объясняется тем, что процесс обследования поездов проводился на некотором расстоянии от места непосредственного отпуска тормозных колодок, а температура колёс за пройденное расстояние и время несколько выравнивалась по отношению к температуре окружающей среды.

За период испытаний проведен контроль более 2000 поездов, проходивших через контролируемый участок пути на испытательном полигоне Исток Свердловской железной дороги. С целью статистического анализа получаемых результатов данные об измерениях температур посредством аппаратуры теплового контроля передавались на пост контроля и экспортировались в нейтральный формат для передачи в программу статистической обработки данных SPSS Statistics.

Проведенный статистический анализ экспериментальных данных позволил выявить основные тенденции в нагреве колёс поездов на данном участке железной дороги и обобщить некоторые из сделанных выводов. Для этого произведена выборка результатов контроля по 200 поездам различной составности и по каждой из 200 образовавшихся выборок принята нулевая гипотеза о том, что распределение случайной величины (максимальной регистрируемой температуры колеса) явля-

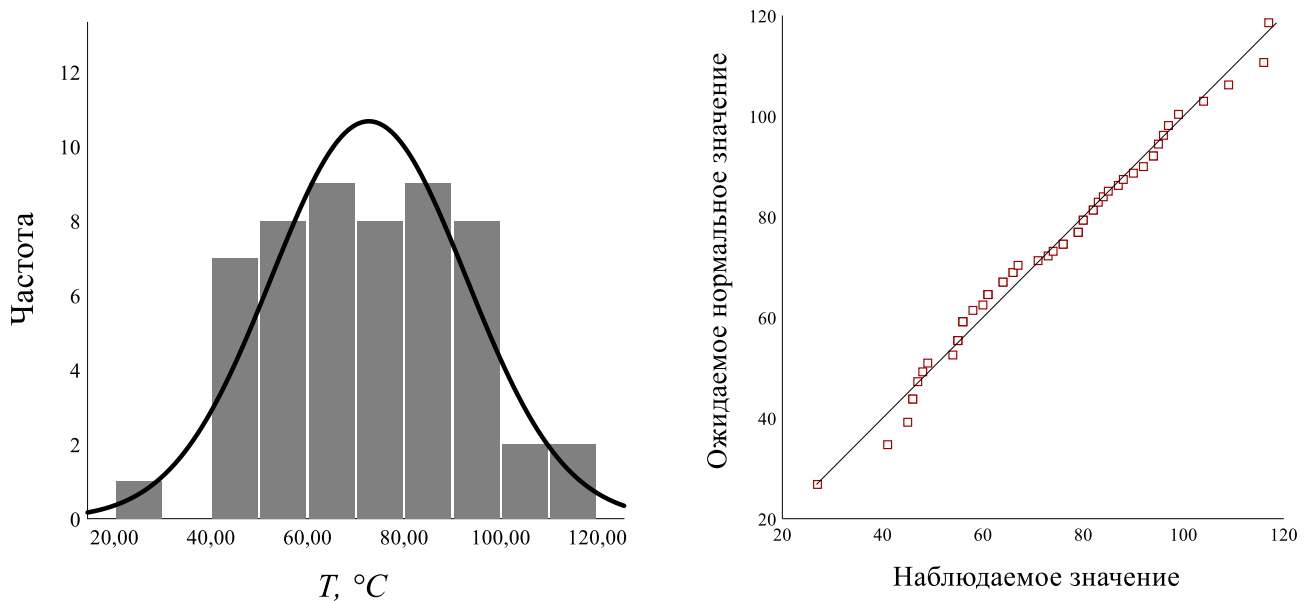
ется нормальным со средними значениями и стандартными отклонениями, рассчитываемыми на основе полученных данных. Проверка нулевой гипотезы проводилась на основании одновыборочного нормального критерия Колмогорова-Смирнова с учетом модификации Лиллиефорса и уровнем значимости 0,05. Критерий основан на максимуме разности между кумулятивным распределением выборки и предполагаемым кумулятивным распределением:

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)|, \quad (3.1)$$

где $F_n(x)$ – кумулятивное распределение выборки,

$F(x)$ – ожидаемое кумулятивное распределение (с известными параметрами).

Анализ результатов проверок показал, что температуры колёс в подвижном составе при реализации колодочного торможения подчиняются закону нормального распределения с минимальной значимостью 0,133. Проиллюстрируем сделанный вывод гистограммами распределения температур и графиками квантиль-квантиль по некоторым из рассмотренных выборок (рисунок 3.14).



а) поезд №7: $N = 54$, $\sigma = 20,1839^\circ\text{C}$

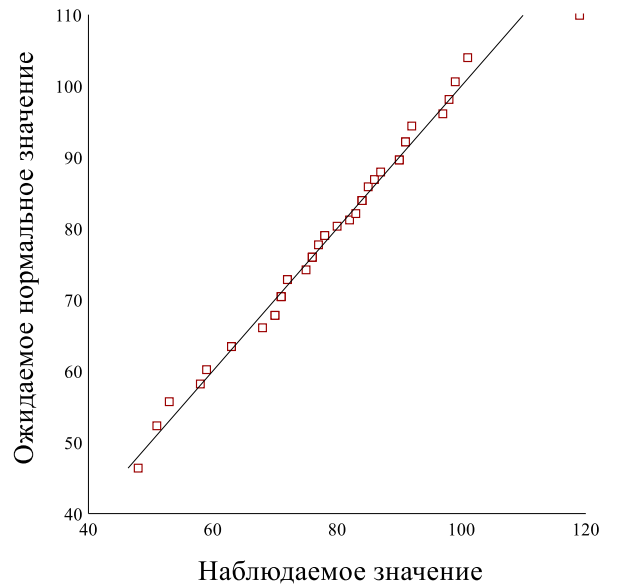
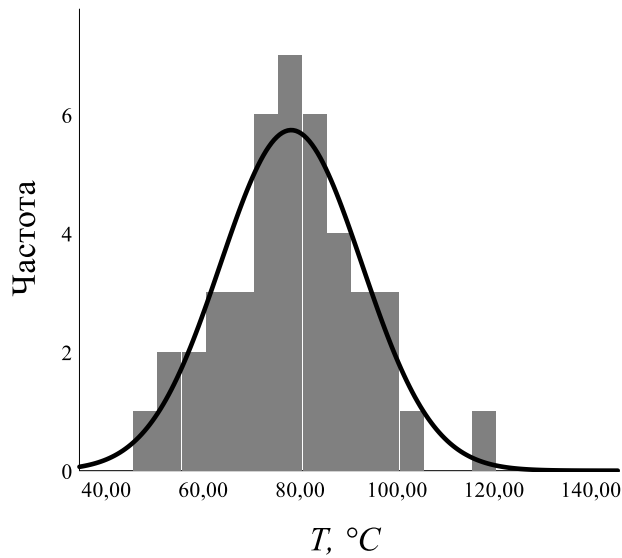
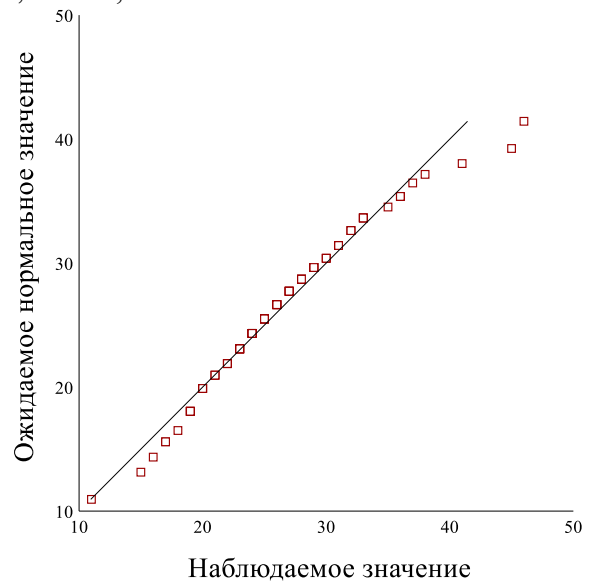
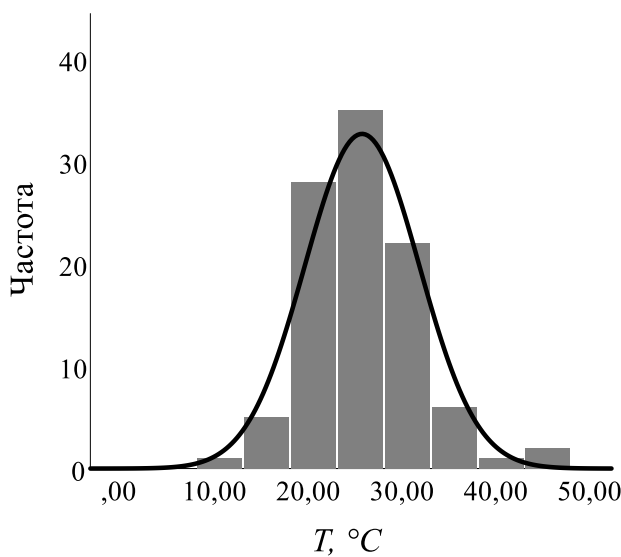
б) поезд №143: $N = 42$, $\sigma = 14,5997^{\circ}\text{C}$ в) поезд №157: $N = 100$, $\sigma = 6,101^{\circ}\text{C}$

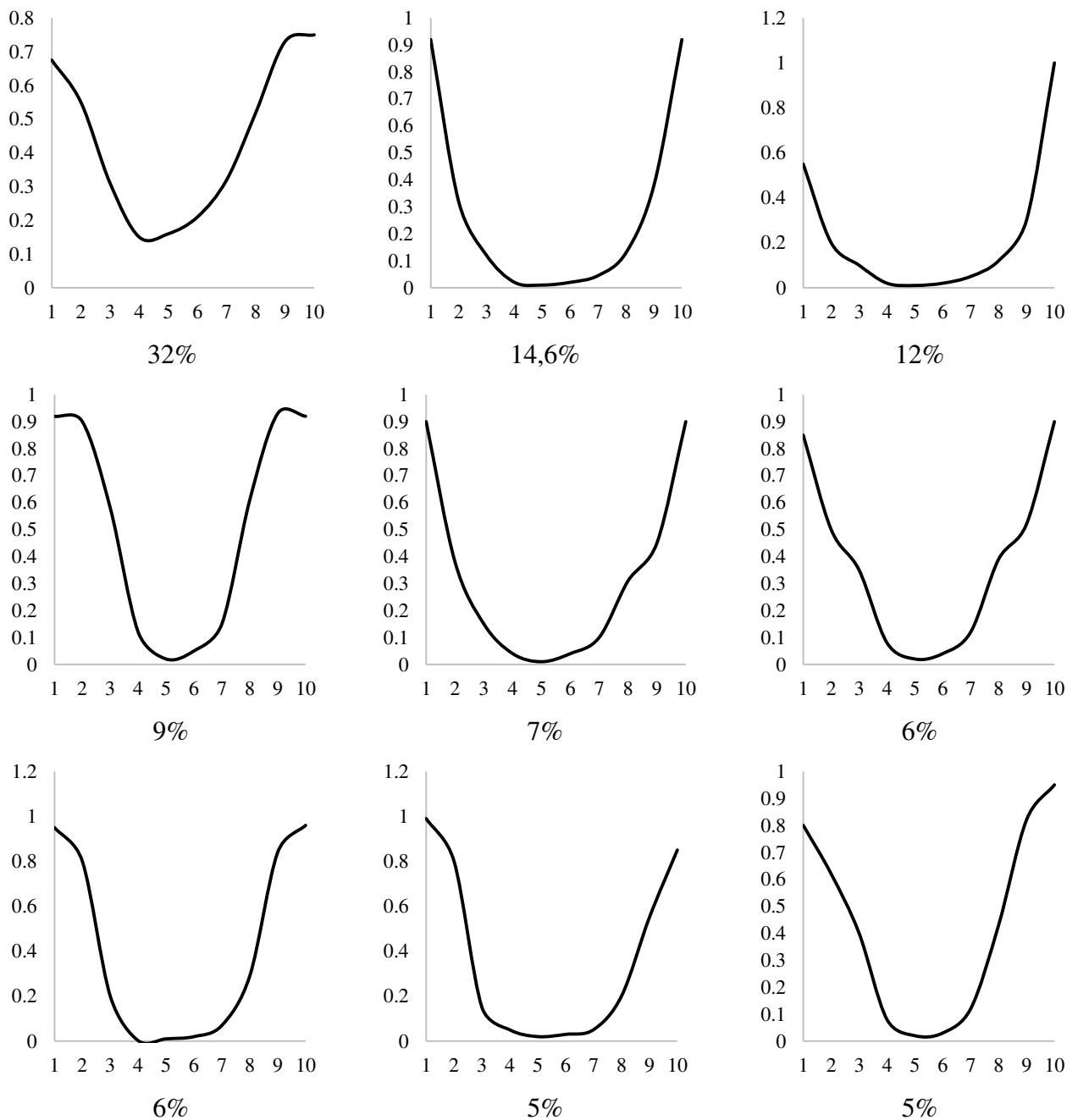
Рисунок 3.14 – Результаты проверок гипотез о нормальном характере распределений температур колёс в поездах при колодочном торможении

На основании полученных данных сделан вывод о том, что температуры колёс в подвижном составе при торможении подчиняются закону нормального распределения. В этой связи целесообразно использовать статистические методы для отыскания колёс со значительными отклонениями по температуре нагрева. Используя характеристики нормального распределения вместе с назначаемыми абсолютными пороговыми значениями температур, можно обнаружить как чрезмерно, так и недостаточно нагретые колёса. Исходя из так называемого правила трёх сигм (3σ), известно, что с вероятностью 99,73% значение нормально распределённой

случайной величины лежит в интервале $(\bar{x} - 3\sigma; \bar{x} + 3\sigma)$, т. е. плюс, минус трёх среднеквадратичных отклонений от среднего значения случайной величины. Это правило необходимо использовать при проектировании отечественных СТК для оценки работоспособности колодочных тормозов.

С целью статистической оценки характерных форм сигналов при осуществлении теплового контроля посредством камеры Т45 полученные экспериментальные данные отсортированы и нормализованы. В результате получены наиболее часто встречающиеся формы сигналов (рисунок 3.15).

Параболические формы сигналов



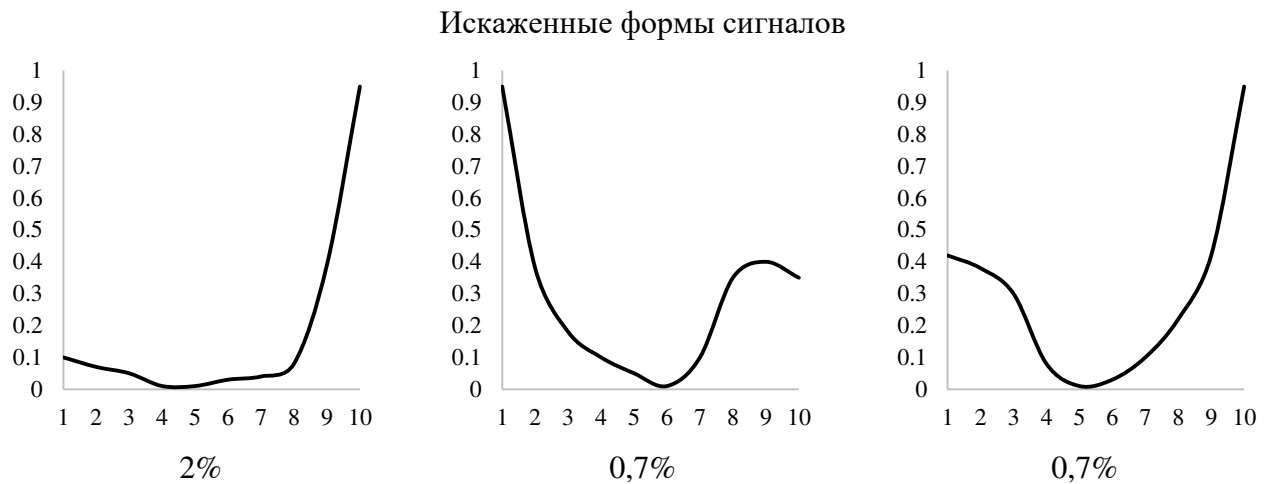


Рисунок 3.15 – Формы сигналов, определенные по результатам статистического исследования экспериментальных данных (ось абсцисс – точка измерения, ось ординат – уровень сигнала)

Как видно из рисунка 3.15, подавляющую часть (96,6%) составляют параболические сигналы, форма которых была показана ранее в п. 3.2. В полученной выборке также обнаружены сигналы (3,4% от общего числа) с явными признаками асимметрии, что свидетельствует о попадании в зону контроля нежелательных элементов. Поскольку на испытательном участке отмечается редкое применение тормозных средств, объяснение данных искажений форм сигналов только на основании полученных экспериментальных данных весьма затруднительно. Гипотеза о причинах искажений сигналов будет рассмотрена в главе 4 при рассмотрении вопросов, связанных с выбором наиболее информативной зоны на колесе для проведения теплового контроля колодочных тормозов.

3.4 Оценка адекватности комплексной диагностической модели теплового контроля колодочных тормозов

В период испытаний случайным образом производился отбор данных по режимам торможения ряда грузовых поездов при помощи локомотивных систем сбора и регистрации данных с последующим их сопоставлением с результатами теплового контроля. Для этого после окончания поездки и передачи малогабарит-

ного энергонезависимого модуля памяти (МПМЭ) в депо с помощью автоматизированного рабочего места (АРМ) расшифровщика производилось считывание и расшифровка полученной информации с регистрацией следующих показателей:

- пройденный путь;
- направление движения;
- скорость движения;
- ускорение и замедление движения;
- давление в тормозном цилиндре, тормозной и питательной магистралях.

Кроме того, при проведении сотрудниками депо технического обслуживания вагонов производился сбор информации, касающейся вагонов, не оборудованных авторежимом, с целью возможности сопоставления экспериментальных данных и результатов численного моделирования:

- об используемых тормозных колодках;
- о режимах торможения, на которые включены воздухораспределители.

Специфика участка экспериментальных исследований предполагает торможение с более низких скоростей, чем были рассмотрены в п. 3.1. Средняя скорость начала торможения на участке равна ~ 40 км/ч. В этой связи, а также с целью учета температуры окружающей среды, в соответствии с полученными экспериментальными данными проведены дополнительные расчеты с использованием разработанной модели, основные характеристики которых показаны в таблице 3.5.

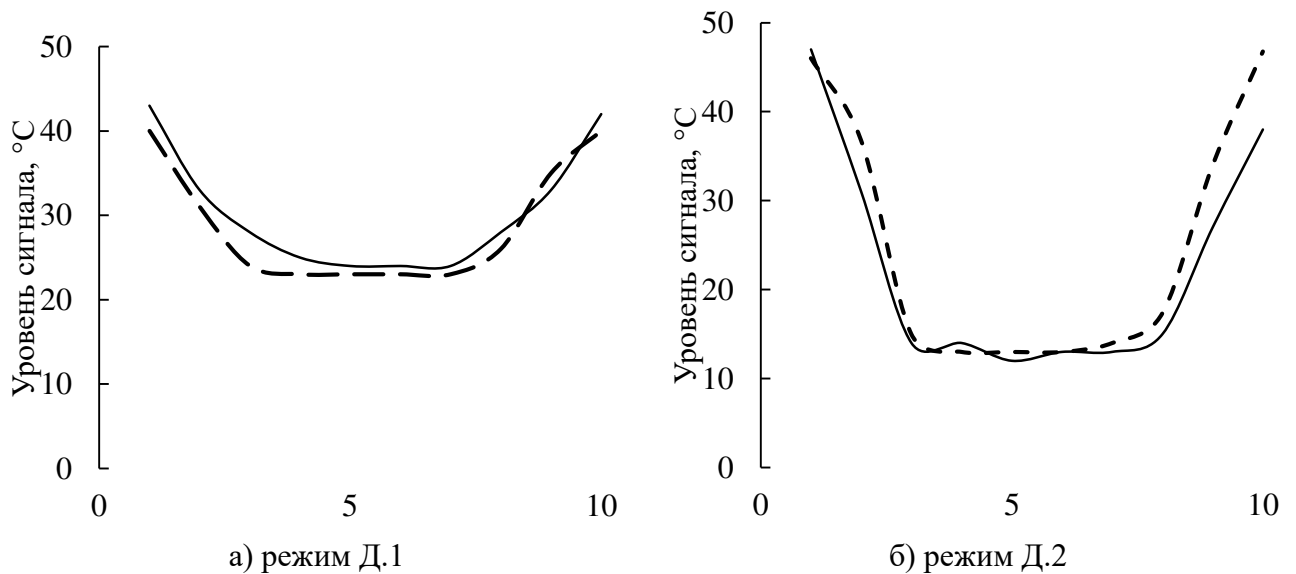
Таблица 3.5 – Дополнительные режимы торможения для подтверждения корректности разработанных компьютерных моделей

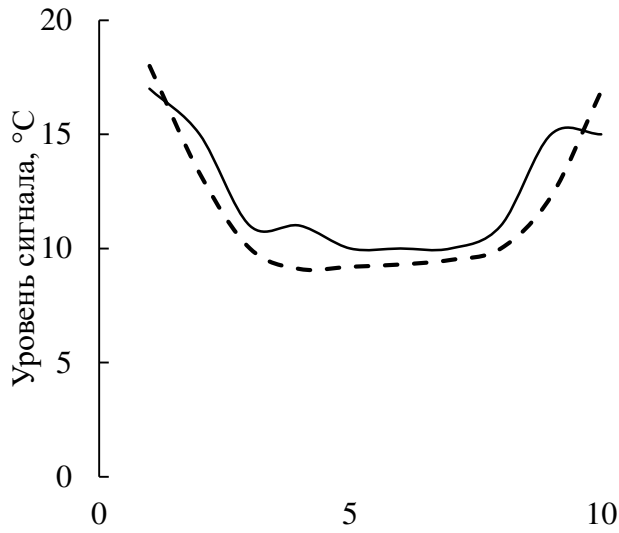
№	Начальная скорость торможения, км/ч	Скорость на момент прохождения СТК, км/ч	Режим ВР	Температура окружающей среды, °С	Дата и время проведения контроля вагона	Ориентация ИК-оптики СТК
Д.1	42	34	С	8	16.05.2018 г. 12:19	Т45
Д.2	44	26	С	10	16.05.2018 г. 13:36	
Д.3	38	21	П	9	16.05.2018 г. 16:59	
Д.4	41	32	Г	16	17.05.2018 г. 11:42	

№	Начальная скорость торможения, км/ч	Скорость на момент прохождения СТК, км/ч	Режим ВР	Температура окружающей среды, °С	Дата и время проведения контроля вагона	Ориентация ИК-оптики СТК
Д.5	43	16	С	2	22.05.2018 г. 04:03	ТИ05
Д.6	39	12	Г	18	24.05.2018 г. 17:30	
Д.7	36	23	С	16	24.05.2018 г. 18:08	
Д.8	28	12	С	12	25.05.2018 г. 14:49	
Д.9	45	11	П	3	26.05.2018 г. 01:20	
Д.10	37	14	Г	-1	27.05.2018 г. 02:40	

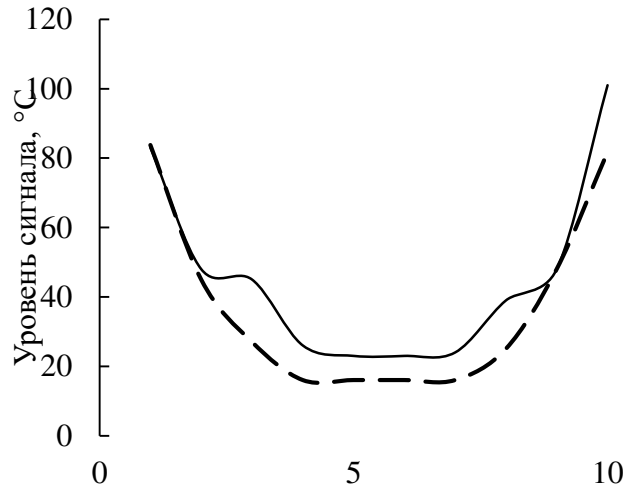
Примечание: тип тормозных колодок в рассматриваемых режимах – композиционная

Для подтверждения корректности разработанных моделей выполнялось наложение сигналов, полученных при помощи комплексной модели и экспериментально. Результаты наложения сигналов приведены на рисунке 3.16.

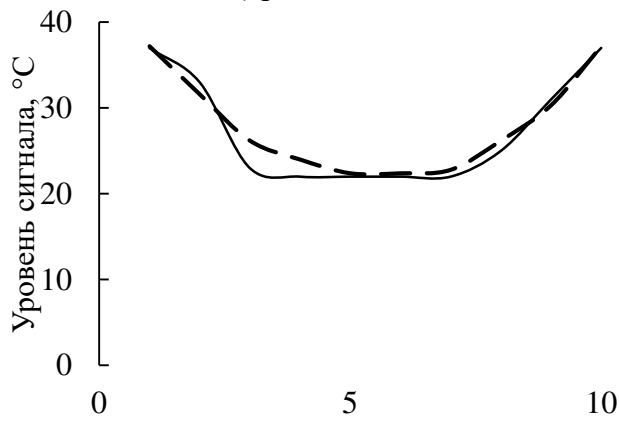




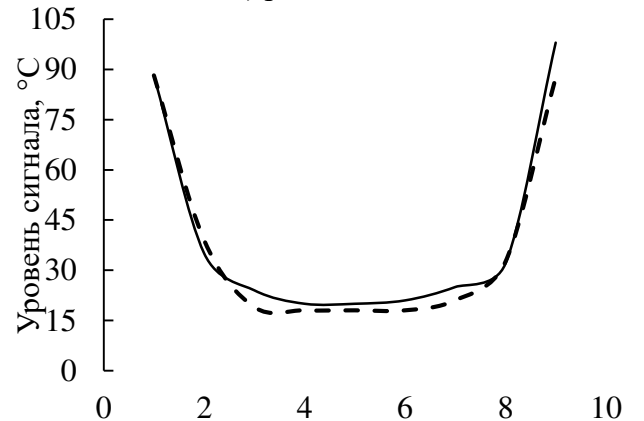
в) режим Д.3



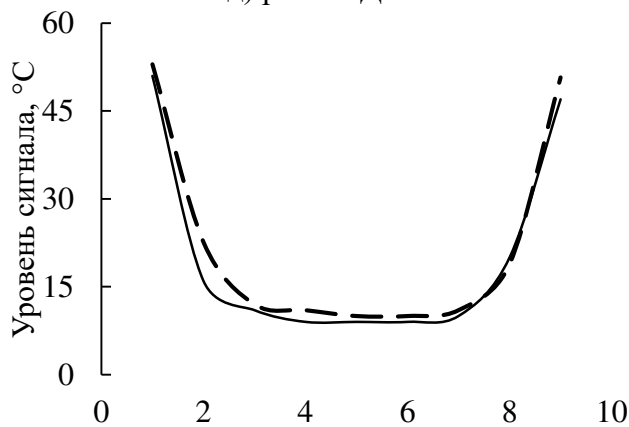
г) режим Д.4



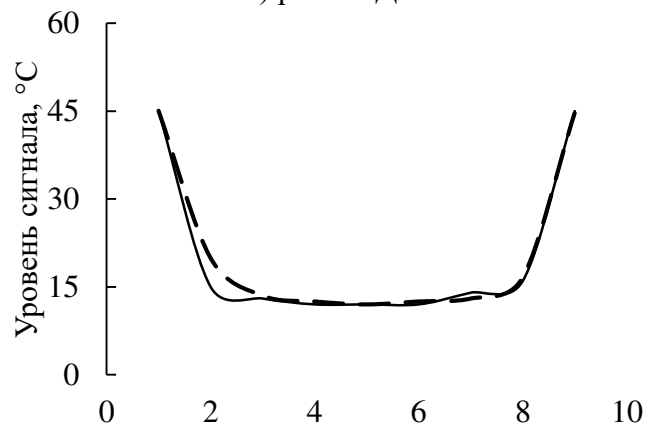
д) режим Д.5



е) режим Д.6



ж) режим Д.7



и) режим Д.8

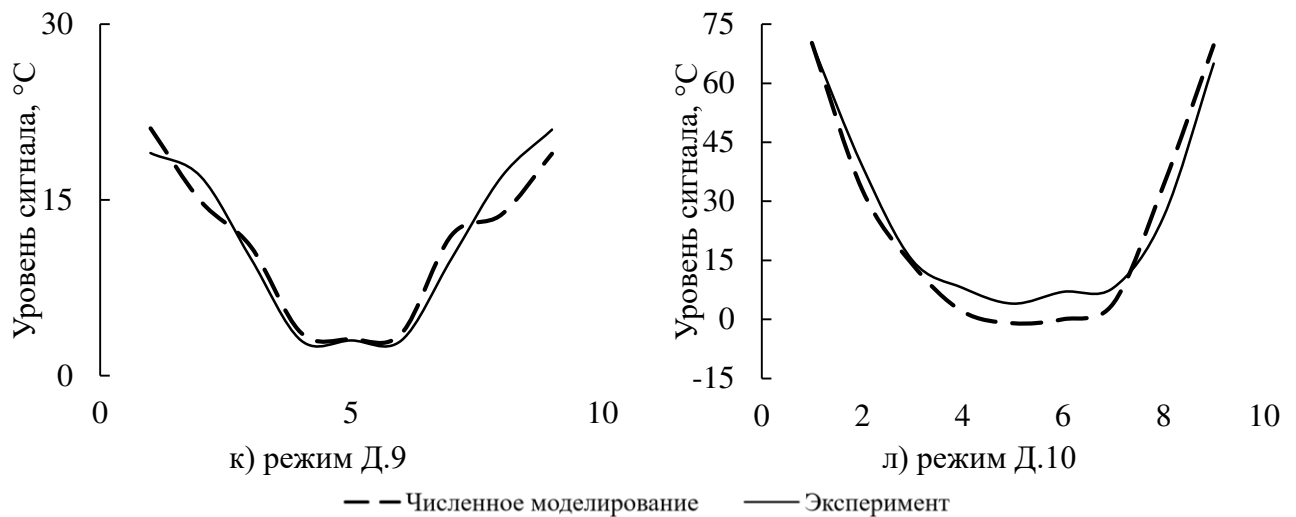
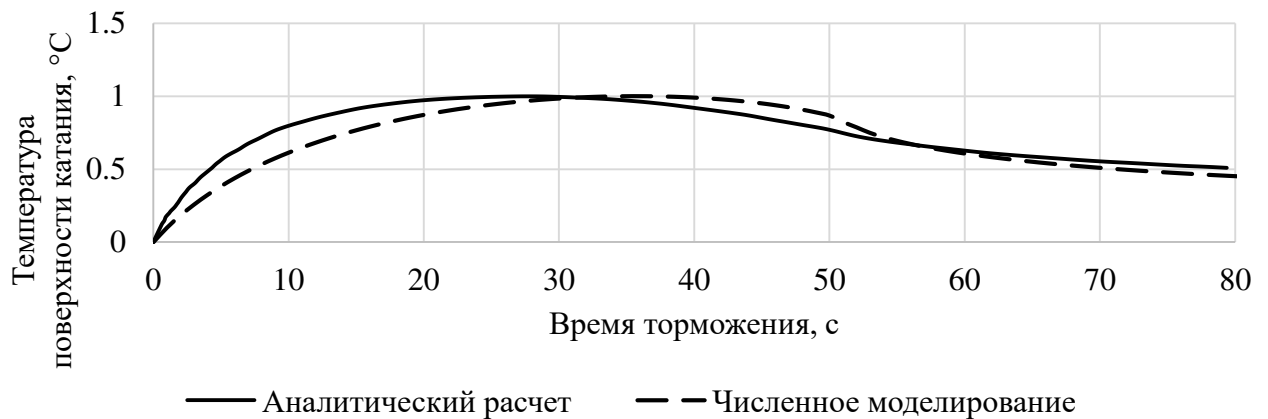


Рисунок 3.16 – Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных исследований (ось абсцисс на графиках соответствует количеству точек измерения)

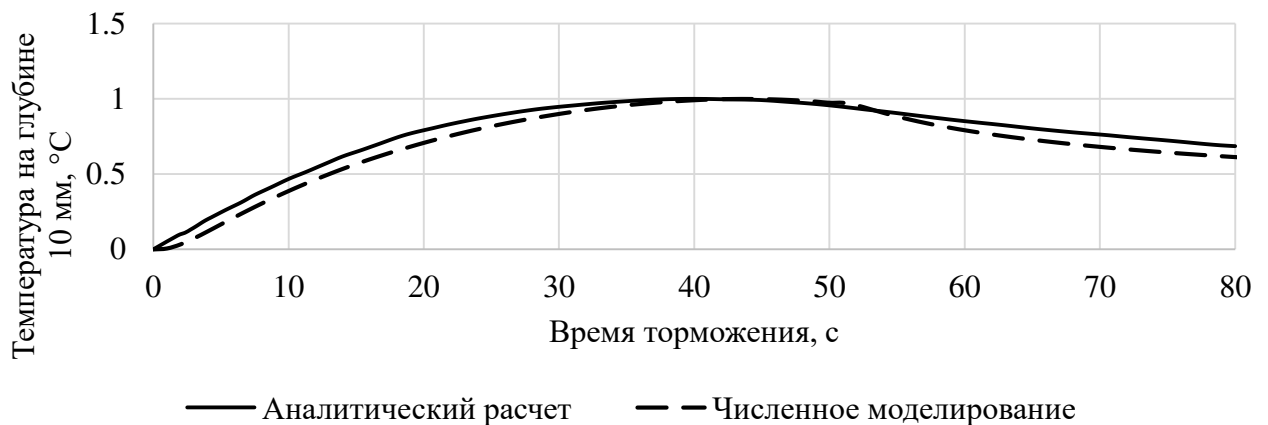
Как видно из рисунка 3.16, разница между максимальными значениями температур, определенными экспериментально и при помощи численного моделирования незначительна и составляет не более 5%. При этом более значительная разница наблюдается в «средней» части сигнала, соответствующей сканированию дисковой части колеса. В случае контроля камерой ТИ05 в «дневных» режимах такая разница может быть обусловлена влиянием продолжительного солнечного излучения, вызывающего дополнительный нагрев внешних поверхностей колес. Однако, как видно из приведенных результатов, разницу между получаемыми сигналами в целом можно признать несущественной.

Корректность результатов моделирования подтверждается и другими соображениями. Во-первых, формы графиков изменения температуры в зависимости от времени торможения, полученные для различных глубин от поверхности трения в работах В. Г. Иноземцева [33] аналитическим методом (см. рисунок 1.9), хорошо согласуются с формами аналогичных графиков, полученных численным методом в настоящей работе. Для иллюстрации этого утверждения рассмотрим рисунок 3.17, на котором приведено сравнение графиков, полученных в [33] и в настоящей работе. Для построения этих графиков проведены дополнительные расчеты, в кото-

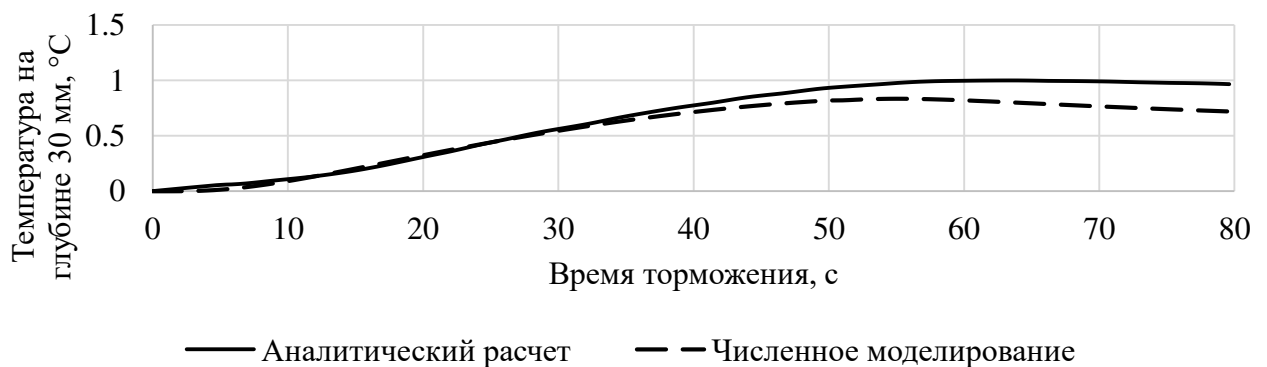
рых моделировалось остывание колеса в течение 30 с после полной остановки поезда. Для сравнения с аналитическим расчетом подобран режим, длительность которого примерно равна длительности режима торможения в [33] (53 с). Исходя из этих соображений, для сравнительного анализа выбран режим 1 (длительность торможения 50 с). После проведения расчетов температуры анализируемых точек приведены к единице для более наглядного сравнения с результатами аналитического расчета.



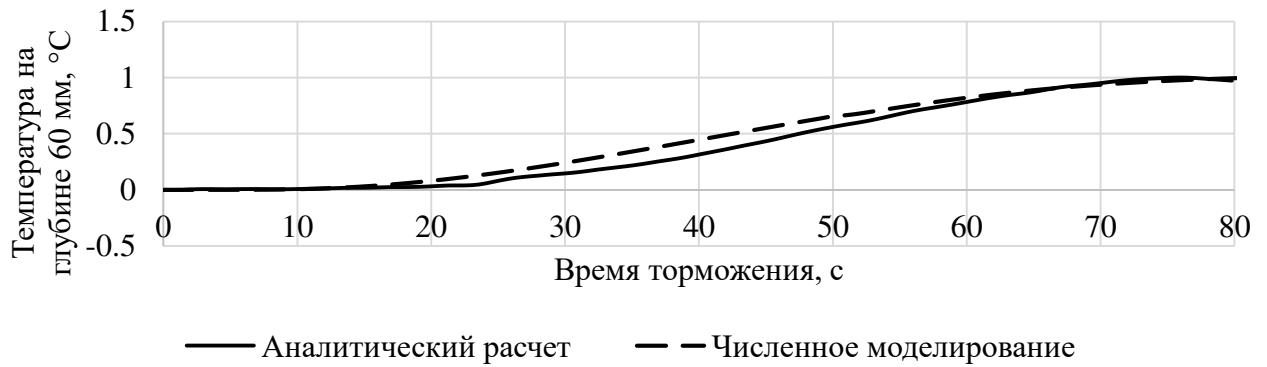
а) сравнение температур на поверхности катания



б) сравнение температур на глубине $x = 10$ мм



в) сравнение температур на глубине $x = 30$ мм



г) сравнение температура на глубине $x = 60$ мм

Рисунок 3.17 – Графики изменения температуры в зависимости от времени торможения для различных глубин от поверхности трения

Как видно из рисунка 3.17, результаты аналитического и численного расчетов практически одинаковы. При этом в среднем разница в формах графиков составляет 5...15% в зависимости от рассматриваемой точки.

Во-вторых, проведено сравнение полученных результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований, проведенных ВНИИЖТ [44]. В указанной работе приведены результаты экспериментальных исследований нагрева колеса при торможении композиционными колодками в двух вариантах – кратковременное и длительное торможение большой мощности.

На рисунке 3.18 приведено сравнение графиков, полученных в настоящей работе, с результатами исследований [44]. При этом, исходя из результатов эксперимента [44] в части достигнутой максимальной температуры на некоторой глубине от поверхности катания колеса (она составила 441°C), из приведенных в п. 3.1 результатов моделирования подобран аналогичный длительный режим торможения композиционной колодкой, в котором максимальная температура поверхности катания колеса достигла 452°C (режим 77, скорость движения вагона 30 км/ч, средний режим воздухораспределителя).

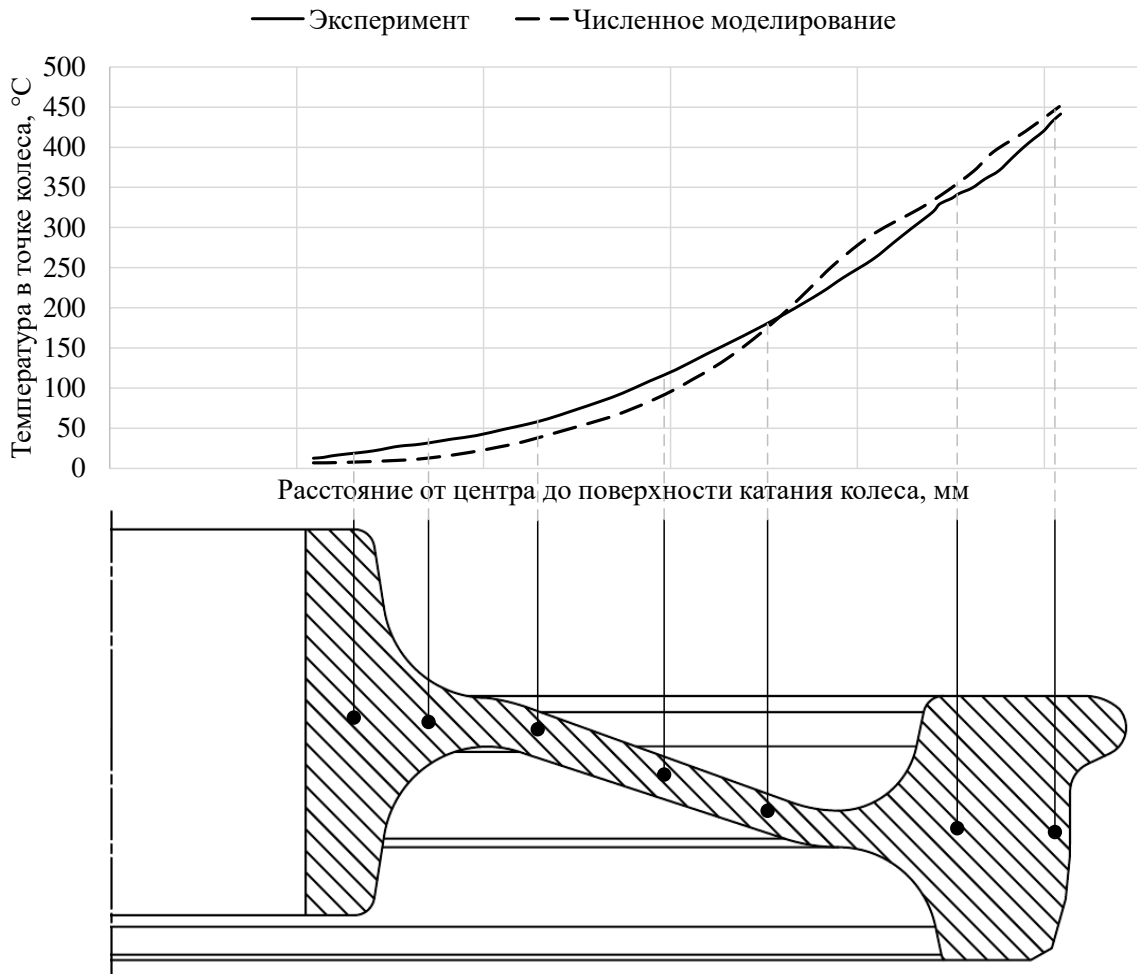


Рисунок 3.18 – Графики температур в сечении колеса, полученные в ходе экспериментальных исследований и рассчитанные численным методом

Как видно из рисунка 3.18, распределения температур, полученные экспериментально и рассчитанные численным методом, практически идентичны. Разница между результатами численного моделирования и экспериментального исследования составляет не более 5%.

На основании вышеизложенного, сделан вывод о корректности разработанных компьютерных моделей. Разница между результатами численного моделирования, проведенного по изложенной методике, и результатами аналитического расчета [33], а также экспериментальных исследований, проведенных в настоящей работе и в [44], является, на наш взгляд, приемлемой.

3.5 Выводы по главе 3

1 Проведено компьютерное моделирование нагрева колёс в различных режимах торможения и при его заклинивании, позволившее сделать вывод о том, что наибольшее влияние на нагрев колеса оказывают скорость начала торможения, износ колеса, режим воздухораспределителя, материал-наполнитель колодки и продолжительность торможения. Результаты моделирования показывают, что температура колеса при колодочном торможении в штатных кратковременных режимах может достигать 260°C (композиционная колодка) на поверхности катания колеса, в длительных режимах до 20 минут – более 650°C с прогревом металла по всему сечению колеса.

2 Моделирование нагрева заклиненного колеса показало, что при этом процессе происходит интенсивный нагрев колеса до высоких температур (670°C) за относительно небольшой промежуток времени с последующим быстрым охлаждением и падением температуры колеса до температуры окружающего воздуха менее чем за 5 минут.

3 Проведено компьютерное моделирование процесса осуществления бесконтактного теплового контроля на основе разработанной модели при различных вариантах ориентации инфракрасной оптики на объект контроля. Результаты моделирования показали существенные различия в получаемых СТК сигналах при изменении ориентации ИК-оптики. Для всех рассмотренных случаев характерно сохранение параболической формы сигнала с изменением амплитудных участков, характеризующих сканирование различных составных частей колеса. Установлено, что при ориентации оптики с внешней стороны колеса, в зону контроля попадает поверхность катания колеса, что позволяет регистрировать максимальную температуру колеса. Ориентация ИК-оптики на колесо с его внутренней стороны позволяет исключить возможное ложное срабатывание СТК при экстренном торможении поезда, а также получить приблизительное представление о максимальной температуре поверхности катания колеса на основании температуры гребня. Сделан

вывод о невозможности диагностирования заклиненных колёс средствами теплового контроля при использовании оптики и вариантов её ориентации, рассмотренных выше.

4 С использованием различной аппаратуры регистрации температур колёс проведен мониторинг нагрева колёс в реальных условиях эксплуатации. Так с использованием тепловизора Fluke Ti450 проведена тепловизионная съемка движущихся грузовых составов для сравнения действительных максимальных температур колёс со значениями, получаемыми средствами теплового контроля. Результаты анализа полученных данных позволили сделать вывод о качественной сходимости проводимых измерений с результатами съемки.

5 На основе данных о нагреве колёс в реальных условиях эксплуатации, полученных в настоящей работе, результатов экспериментальных исследований в других работах и аналитических расчетов по определению температурных полей в колёсах подвижного состава при колодочном торможении подтверждена адекватность разработанных компьютерных моделей. Разница между результатами численного моделирования и экспериментальных исследований составляет не более 5%, аналитических расчетов – не более 15%.

4 РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ

Как было показано в главе 1, СТК колодочных тормозов широко применяются за рубежом – в США, Канаде, Австралии, странах Европейского союза, Индии, Китае и других странах. В рамках настоящей главы предлагается:

- более подробно рассмотреть опыт проектирования и реализации СТК в части применяемых алгоритмов, диагностических признаков и требований, предъявляемых к СТК;
- основываясь на результатах проведенного численного моделирования, выбрать и обосновать наиболее информативную зону на колесе и пороговые значения теплового контроля колодочных тормозов;
- разработать алгоритмы теплового контроля для применения в отечественных СТК колодочных тормозов.

4.1 Обобщенный анализ диагностических признаков и параметров зарубежных систем теплового контроля колодочных тормозов и требований, предъявляемых к ним

Прежде всего, стоит ввести понятия «горячих» и «холодных» колёс, которые повсеместно используются в зарубежной литературе при описании СТК колодочных тормозов. «Горячими» считаются такие колёса, температура которых превосходит некоторое заранее установленное пороговое значение для контролируемого участка пути. «Холодными» же считаются колёса, температура которых значительно ниже по сравнению с температурой других колёс. Оба признака свидетельствует о неполадках колодочного тормоза (неотпущенный, либо недействующий тормоз).

Стандартом австралийской железной дороги [92] предусмотрено три уровня тревоги по степени нагрева колёс подвижного состава: высокий, средний и низкий. СТК, работающие по этому стандарту, в отношении колодочных тормозов имеют

встроенные диагностические модели обнаружения как «горячих», так и «холодных» колес.

Рассмотрим подробнее используемую в стандарте систему диагностических признаков, касающихся модели обнаружения «горячих» колес (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Система диагностических признаков СТК австралийских железных дорог (модель обнаружения «горячих» колёс)

Наименование диагностического признака	Обозначение	Примечание
I. Определяемые средствами теплового контроля		
Температура окружающей среды	T_{OKP}	Контролируется датчиком, установленным в железнодорожной будке.
Абсолютные температуры колеса	T_{AK}	Каждое сканируемое колесо разделяется на две части – обод и ступицу, абсолютные температуры обеих частей контролируются. В процессе диагностики используется большее из полученных значений абсолютных температур.
Относительная температура колеса	T_{OK}	Представляет собой разность между абсолютной температурой колеса и температурой окружающей среды: $T_{OK} = T_{AK} - T_{OKP}$
Средняя относительная температура колеса	$T_{СОК}$	Представляет собой среднюю относительную температуру по всем колёсам одной стороны поезда, причем показания по колёсам локомотива при оценке исключаются из общей выборки и рассматриваются независимо.
II. Настраиваемые СТК		
Пороговые значения относительных температур	S_{OK1} S_{OK2}	Заранее предустановленные оператором пороговые значения относительных температур колёс, превышение которых при определенных условиях, создаст тревожное показание в СТК
Пороговое значение сравнительного отношения	X_K	Заранее предустановленное оператором пороговое значение отношения относительной температуры колеса к рассчитанной средней относительной температуре колёс ($T_{OK} / T_{СОК}$)

Как видно из таблицы 4.1, все диагностические признаки разделены на две категории. Признаки первой категории (температуры окружающей среды и колеса) так или иначе определяются при помощи средств теплового контроля. Признаки второй категории являются настраиваемыми. Имеется два алгоритма обнаружения «горячих» колёс:

1. Если относительная температура колеса T_{OK} больше или равна первому пороговому значению относительной температуры S_{OK1} , то СТК сравнивает температуру колеса T_{OK} со средней относительной температурой колёс по данной стороне поезда $T_{СОК}$. Если отношение этих двух температур T_{OK} и $T_{СОК}$ оказывается больше predetermined порогового значения сравнительного отношения X_K , то СТК создает тревожное показание. Математическая формулировка алгоритма:

$$T_{OK} \geq S_{OK1} \text{ и } T_{OK} / T_{СОК} \geq X_K. \quad (4.1)$$

2. В случае превышения относительной температурой колеса T_{OK} второго порогового значения относительной температуры S_{OK2} СТК создает соответствующее тревожное показание. Математическая формулировка алгоритма приведена ниже:

$$T_{OK} \geq S_{OK2}. \quad (4.2)$$

Пороговые значения S_{OK1} , S_{OK2} , X_K приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Пороговые значения теплового контроля тормозов

Уровень тревоги	S_{OK1} , °C	X_K	S_{OK2} , °C
Высокий	270	3,5	350
Средний	210	2,6	270
Низкий	160	2,0	0

Описанная тревожная модель «горячих» колёс может быть представлена в графическом виде (рисунок 4.1).

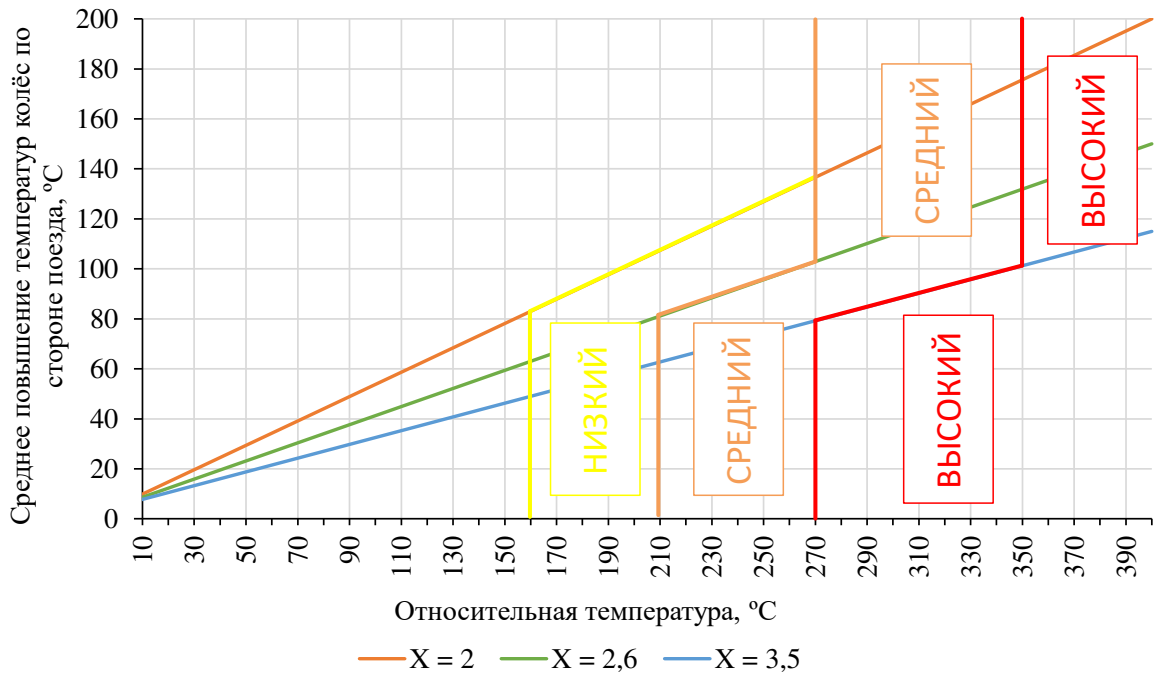


Рисунок 4.1 – Графическое представление тревожной модели «горячих» колёс

В процессе движения поезда через контролируемый СТК участок тормоза могут применяться из различных соображений, продиктованных конкретными условиями эксплуатации подвижного состава. После прижатия тормозных колодок возникают температурные всплески на поверхности катания колеса, попадание которых в зону сканирования может спровоцировать тревожное показание СТК. В этом случае остановка поезда для проверки приведет к неоправданным задержкам поездов и отцепке вагонов. Для исключения возможности выдачи тревожных показаний по температурным всплескам предлагается ввести некоторые исключения в модель обнаружения «горячих» колёс. Например, если поезд замедляется с темпом, большим некоторого предустановленного значения, то пороговые значения относительных температур S_{OK1} , S_{OK2} целесообразно увеличить. При этом должны соблюдаться следующие условия:

- темп замедления (a_3) должен рассчитываться между соседними колесными парами на основе скорости каждой из них;
- для всех единиц подвижного состава, где максимум темпа замедления превзошел предустановленные значения, пороговые значения S_{OK1} и S_{OK2} должны

быть увеличены по всем колесам, температуры которых были записаны в данном поезде;

– пороговые значения сравнительного отношения X_K остаются неизменными.

Рекомендуемые пороговые значения S_{OK1} и S_{OK2} в зависимости от темпа замедления подвижного состава приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Корректированные пороговые значения относительных температур колёс в зависимости от темпа замедления подвижного состава

Уровень тревоги	$S_{OK1}, ^\circ\text{C}$ $a_3 > 0,3 \text{ м/с}^2$	$S_{OK1}, ^\circ\text{C}$ $a_3 > 0,6 \text{ м/с}^2$	$S_{OK2}, ^\circ\text{C}$ $a_3 > 0,3 \text{ м/с}^2$	$S_{OK2}, ^\circ\text{C}$ $a_3 > 0,6 \text{ м/с}^2$
Высокий	300	330	380	410
Средний	240	270	300	330
Низкий	190	220	0	0

Анализируя изложенное, видим, что первый из рассмотренных алгоритмов учитывает повышение относительных температур колёс по всей стороне поезда. Равномерное повышение температур колёс с небольшими всплесками в процессе торможения свидетельствует о нормальной работе тормозного оборудования. Температурные всплески, абсолютной величиной превышающие среднее повышение температуры до 3,5 раз для высокого уровня тревоги, при этом могут быть обусловлены различными факторами, в том числе и бесконечно большим количеством вариантов прохождения колеса через сканирующую аппаратуру. Аномальным согласно алгоритму, считается значительное отклонение от среднего значения, что позволяет в целом снизить количество тревожных показаний от СТК по нагреву колёс.

Второй алгоритм является логическим продолжением первого. Предупреждение по второму алгоритму создается уже при повышении относительной температуры любого колеса по данной стороне поезда до 270°C (средний уровень тревоги). Это пороговое значение соответствует высокому уровню тревоги по первому алгоритму. Значит, СТК создаст тревожное показание в каждом из случаев при достижении любым колесом температуры 270°C , что может свидетельствовать о по-

тенциальном возникновении неисправности даже в случае если среднее повышение температуры по данной стороне поезда находится в допустимых по первому алгоритму пределах.

СТК используются и для обнаружения «холодных» колёс. Система диагностических признаков, используемая при обнаружении «горячих» колёс (таблица 4.1), в этом случае дополняется несколькими признаками (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Система диагностических признаков СТК австралийских железных дорог (модель обнаружения «холодных» колёс)

Наименование диагностического признака	Обозначение	Примечание
Среднее повышение температуры	C_{CP}	Среднее повышение температуры по всем относительным максимумам температур (обода и ступицы) по колёсам одной стороны поезда. Колёса, температуры которых превысили нижний тревожный уровень по модели «горячих» колёс, исключаются из расчета показателя.
Относительная температура колёса	T_{OK}	см. таблицу 4.1
Пороговые параметры модели «холодных» колёс	$ПХК_1$ $ПХК_2$ $ПХК_3$	Устанавливаются отдельно для каждого типа подвижного состава (в т. ч. для различных моделей поездов), что связано с различным конструктивным исполнением зоны, окружающей объект контроля
Коэффициент температурного градиента	α	–

На основе представленной системы признаков предлагается два алгоритма обнаружения «холодных» колёс:

1. Если среднее повышение температуры колёс C_{CP} превышает предустановленное минимальное значение среднего повышения температур $C_{CP_мин}$, то СТК определяет движущийся подвижной состав как находящийся в процессе торможения. Исходя из относительных температур колёс T_{OK} , рассчитывается параметр модели «холодных» колёс по зависимости:

$$C_{cp} - \alpha \cdot T_{OK} \quad (4.3)$$

Если рассчитанное по выражению (4.3) значение окажется больше предустановленного порогового параметра модели «холодных» колёс $ПХК_1$, то СТК создаст

тревожное показание. Математическую формулировку алгоритма представим в следующем виде:

$$C_{CP} \geq C_{CP_мин} \text{ и } C_{CP} - \alpha \cdot T_{OK} \geq ПХК_1. \quad (4.4)$$

2. Аналогично первому алгоритму производится проверка движущегося состава на торможение сравнением среднего повышения температуры колёс C_{CP} с предустановленным значением $C_{CP_мин}$. Если относительная температура колеса T_{OK} выше предустановленного порогового параметра модели $ПХК_2$, а среднее повышение температуры колёс C_{CP} выше предустановленного порогового параметра модели $ПХК_3$, то СТК создаст тревожное показание. Математическая формулировка алгоритма запишется в виде:

$$C_{CP} \geq C_{CP_мин} \text{ и } T_{OK} \geq ПХК_2 \text{ и } C_{CP} \geq ПХК_3. \quad (4.5)$$

Для грузовых вагонов предлагается использовать следующие значения параметров СТК: $ПХК_1 = 25$, $ПХК_2 = 10$, $ПХК_3 = 30$, $C_{CP_мин} = 30$, $\alpha = 1,3$.

Анализ показывает, что для большинства участков пути применимы пороговые значения, приведенные в таблице 4.2, однако для некоторых участков, в особенности затяжных спусков, возможна корректировка этих значений. В качестве примера можно привести участок железной дороги Сидней – Спрингвуд, для которого S_{OK2} составляет 410°C для высокого уровня тревоги и 330°C – для среднего (т.е. пороговое значение температуры для этого участка пути повышено на 60°C относительно рекомендуемых стандартом).

Дополнительно стоит отметить, что австралийским стандартом не устанавливаются какие-либо требования к ориентации приемников ИК-излучения, а также не приводится обоснование выбора основных параметров теплового контроля (к примеру, выбора порогового значения сравнительного отношения X_K). Однако анализируя систему диагностических признаков в таблице 4.1, в частности, обращая внимание на показатель абсолютной температуры колёс T_{AK} , получаемый СТК для

обода и ступицы, можно предположить, что в австралийских СТК оптика ориентируется на ступицу колеса. В явном виде указанные вопросы подробнее освещены в стандартах СТК североамериканских железных дорог (США и Канады) [119], [103].

СТК колодочных тормозов в Канаде являются составной частью путевой инфраструктуры, известной под общим названием путевой системы технического контроля (ПСТК). На участках с затяжными спусками и подъемами требуется поддержание относительно невысокой скорости тяжеловесных поездов. Очевидно, что на таких участках температура всех колёс в поезде должна значительным образом увеличиваться, поэтому СТК настраиваются на обнаружение «холодных» колёс. Обнаружение «горячих» колёс, напротив, более целесообразно на прямых участках пути с небольшими уклонами, где не ожидается применения тормозов поездом, а колёса в среднем должны иметь относительно низкую температуру.

Приемники ИК-излучения имеют такую ориентацию, при которой сканируются оба колеса проходящей колесной пары (в терминах стандартов [103; 119] – колёса ближнего и дальнего рельсов). Для обеспечения точности теплового контроля температура каждого колеса приводится к безразмерному виду с использованием поправочных коэффициентов, рассчитываемых отдельно по каждому рельсу:

$$\begin{aligned} PK_1 &= (1 + CP_2 / CP_1) / 2, \\ PK_2 &= (1 + CP_1 / CP_2) / 2, \end{aligned} \quad (4.6)$$

где PK_1 – поправочный коэффициент для ближнего рельса;

PK_2 – поправочный коэффициент для дальнего рельса;

CP_1 – средняя относительная температура колёс по ближнему рельсу;

CP_2 – средняя относительная температура колёс по дальнему рельсу.

Как и в австралийском стандарте, в средние значения относительных температур колёс по стороне поезда не включаются температуры колёс локомотива. Измеренные температуры колёс затем приводятся к единичному виду умножением на соответствующий поправочный коэффициент:

$$\begin{aligned} K_{1_1} &= PK_1 \cdot K_1, \\ K_{2_1} &= PK_2 \cdot K_2, \end{aligned} \quad (4.7)$$

где K_1, K_2 – относительные температуры колёс по ближнему и дальнему рельсам соответственно;

K_{1_1}, K_{2_1} – приведенные к единичному виду температуры колёс по ближнему и дальнему рельсам соответственно.

В канадских СТК применяются следующие пороговые значения теплового контроля для оценки эффективности процесса торможения:

а) для создания тревожного показания по обнаружению «холодного» колеса относительная температура колеса не должна превышать 20°C при средней относительной температуре всех колёс более 95°C ;

б) для создания тревожного показания по обнаружению «горячего» колеса относительная температура колеса должна превысить 260°C .

Резюмируя вышеизложенное, запишем математические формулировки алгоритмов, используемых в канадских СТК для обнаружения «горячих»:

$$T_{\text{OK}} \geq 260^\circ\text{C} \text{ и } X_{\text{K}} = 3,0, \quad (4.8)$$

и «холодных» колёс:

$$T_{\text{OK}} \leq 20^\circ\text{C} \text{ и } X_{\text{K}} = 3,0 \text{ и } C_{\text{CP}} \geq 95^\circ\text{C}. \quad (4.9)$$

В укрупненном виде параметры СТК и требования, предъявляемые к ним, на североамериканской железной дороге (США и Канада в целом) приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Параметры СТК североамериканской железной дороги и требования, предъявляемые к ним

Параметр	Тип	Значение
Выбор места установки	Размер места установки	1 шпала для приемников ИК-излучения + 2 шпалы для установки счетчика колёсных пар
	Скоростные ограничения	нижний предел скорости: 16 км/ч верхний предел скорости: от 160 до 480 км/ч
	Требования к пути	На прямых участках пути с небольшими уклонами, где нет необходимости в применении тормозов

Параметр	Тип	Значение
Эксплуатационные параметры и технологическая основа	Тип сообщения	Пассажирское, грузовое
	Разрешение, К	± 1
	Точность измерений, К	± 3
	Температура окружающего воздуха, °С	от минус 40 до плюс 70
	Приемник ИК-излучения	ИК-датчик
Передача данных	Поддерживаемые технологии	E-mail, факс, Wi-Fi, радио
	RFID, AEI	да
Пороговые значения теплового контроля	Для обнаружения «горячих» колёс	высокий уровень тревоги: $T_{OK} > 350^{\circ}\text{C}$ средний уровень тревоги: $260^{\circ}\text{C} < T_{OK} < 350^{\circ}\text{C}$ низкий уровень тревоги: $T_{OK} < 260^{\circ}\text{C}$
Порядок действий при получении тревожного показания	Для обнаружения «горячих» колёс	Остановить поезд, провести проверку, эксплуатация вагона возможна при разрешении проблемы, в противном случае вагон отцепляется
Калибровка, обслуживание	Частота	Каждые три года

Анализ таблицы 4.5 представляет особенный интерес в плане назначенных пороговых значений теплового контроля. Сравнивая их с аналогичными показателями, рекомендуемыми австралийским стандартом (таблица 4.2), видим их практически полную идентичность, в особенности, в части второго алгоритма обнаружения «горячих» колёс.

Опыт проектирования и применения СТК в США и Канаде показал, что ориентация приемника ИК-излучения на контролируемое колесо строго не регламентируется и носит рекомендательный характер. Так, стандартом США [119] рекомендуется установка приемника ИК-излучения согласно рисунку 4.2.

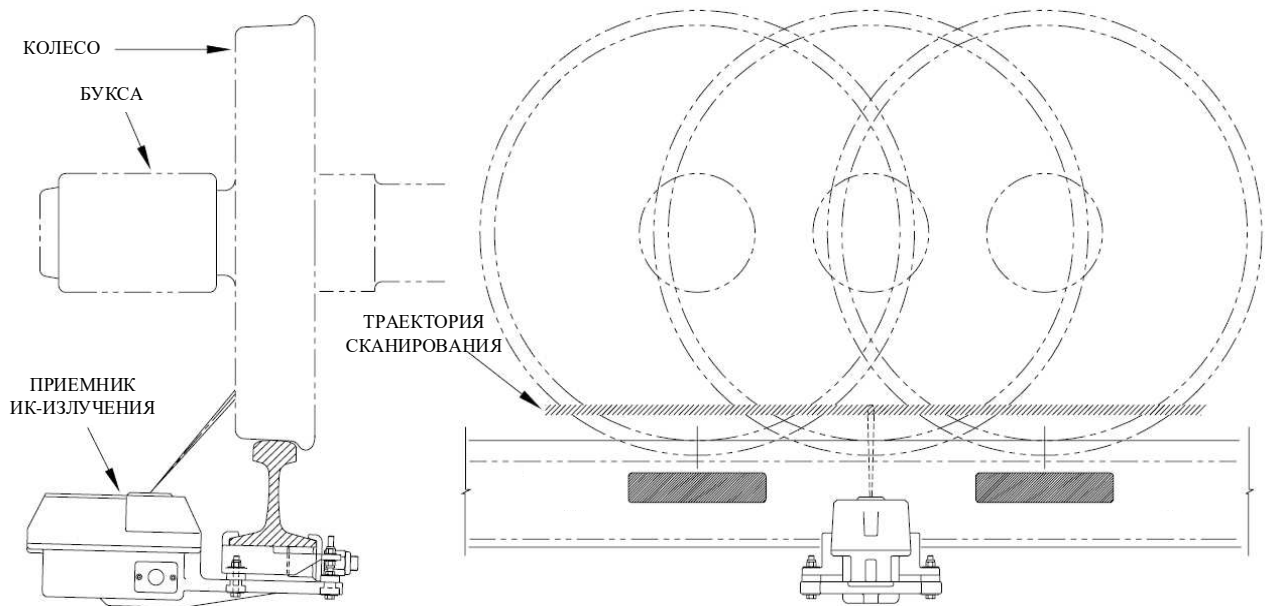


Рисунок 4.2 – Ориентация ИК-оптики, предлагаемая стандартом [119]

Как видно из рисунка 4.2, приемник ИК-излучения ориентирован под углом 45° к оси пути на высоту 101,6 мм (4 дюйма) над уровнем головки рельса (УГР). Некоторые канадские операторы, напротив, ориентируют оптику под углом 90° на высоте 50,8 мм (2,5 дюйма) над УГР [117]. Температуру окружающей среды в такой постановке предлагается регистрировать при помощи установки специального белого защитного экрана на дальней стороне пути напротив сканирующей аппаратуры. Ориентация оптики на колесо под прямым углом продиктована следующими соображениями. Сканирование колеса под таким углом снижает шанс неверного считывания повышения температуры на поверхности катания колеса в момент его входа и выхода из зоны контроля. Позиционированный таким образом приемник контролирует только одну сторону поезда (по ближнему к приемнику рельсу) по примеру австралийского стандарта.

Обобщенный анализ технической и нормативной информации об СТК колодочных тормозов, применяемых в странах Европейского союза, показал достаточное количество их технических реализаций. Основные параметры СТК, пороговые значения, диагностические признаки в целом мало отличаются от рассмотренных

выше. Стоит также отметить богатую нормативную базу, касающуюся СТК буксовых узлов [98]. Нормативными документами определен технический облик СТК буксовых узлов, основные предъявляемые требования к ним, рекомендуемые пороговые значения теплового контроля, рекомендации по их подбору в зависимости от условий эксплуатации. Как показывает анализ, нормативная база стран Европейского союза широко используется в качестве основы для разработки местных норм и правил проектирования и реализации СТК других стран – Израиля [108], Индии [102]. Однако несмотря на широкое применение СТК колодочных тормозов на железных дорогах Европейского союза, как таковой нормативной базы именно для такого типа СТК не разработано.

4.2 Выбор наиболее информативной зоны на колесе для теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава

С целью выбора наиболее информативной зоны на колесе для теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава предлагается провести более подробный анализ полученных в главе 3 полноразмерных картин распределения температур в колесе при различных режимах торможения. При их рассмотрении также будем учитывать температурное распределение в теле колодки, которое может оказать существенное влияние на результаты теплового контроля колодочных тормозов.

На рисунке 4.3 приведены температурные распределения в сечении колеса и колодках при торможении со скорости 100 км/ч с использованием чугунных и композиционных тормозных колодок при груженом режиме воздухораспределителя (в момент окончания торможения).

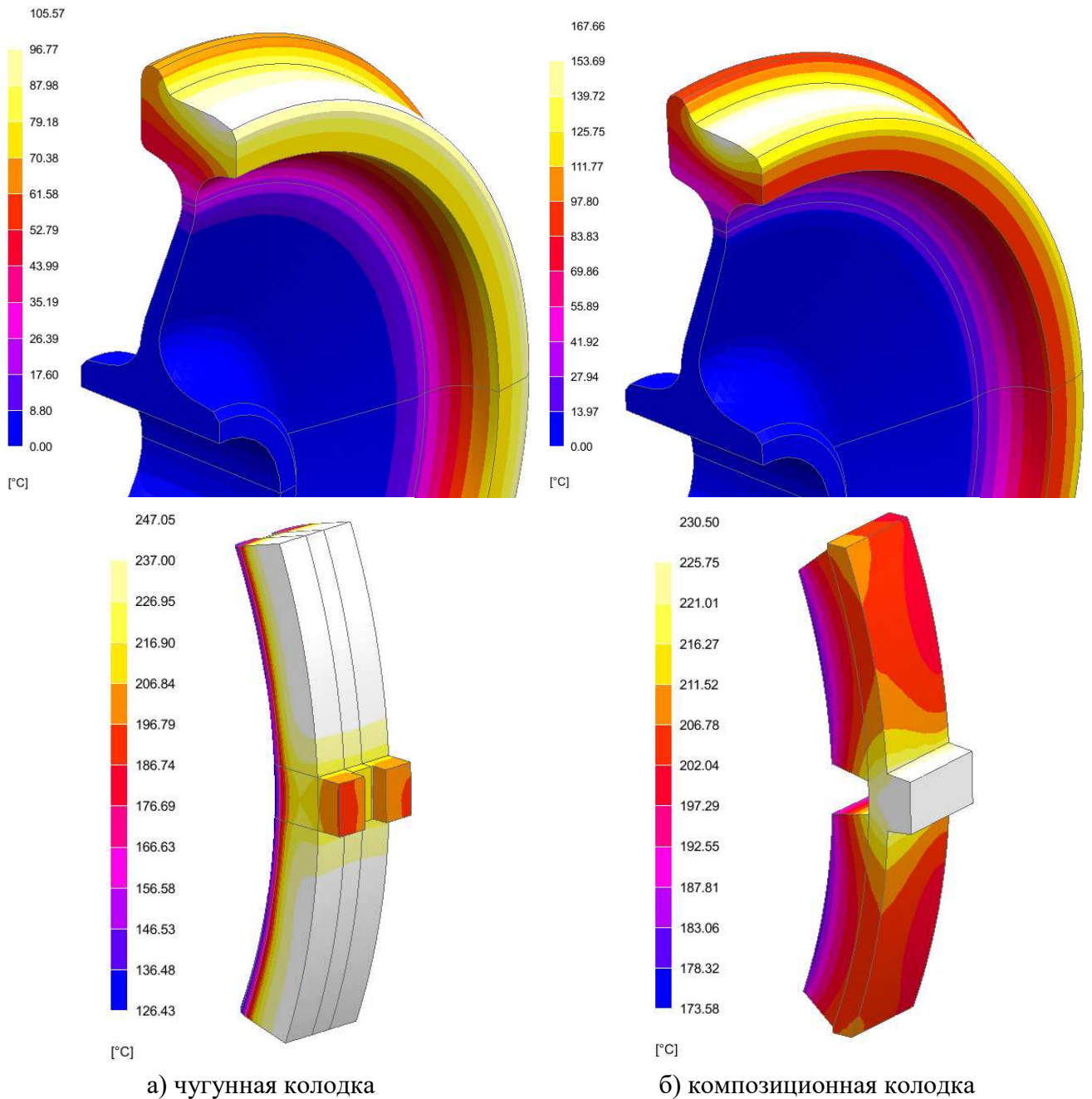


Рисунок 4.3 – Нагрев колёс и тормозных колодок при груженом режиме воздухо-распределителя и различных типах колодок

Как видно из рисунка 4.3, использование чугунных тормозных колодок в целом обеспечивает более благоприятный температурный режим колодочного торможения. Распределение температур по ободу колеса носит равномерный характер без видимой зоны концентрации нагрева, как это наблюдается при торможении композиционными колодками. К тому же, нагрев при использовании композиционных колодок происходит вглубь металла колеса, что обусловлено конструкцией

колодки. Анализ показывает, что при реализации подобных кратковременных режимов торможения (суммарное время прижатия колодок до 200 с) распределение температур по сечению колеса стремится к картинам, показанным на рисунке 4.3, а основным изменениям подвергается лишь цветовая температурная шкала и численные значения температур.

В этой связи целесообразно ввести понятие «паттернов» [110] нагрева колеса, описывающих характер распределения температур в колесе при реализации различных по длительности режимов торможения без указания численных характеристик этого распределения. Паттерны нагрева колеса при различной длительности процесса торможения, сгруппированные в зависимости от применяемого типа тормозной колодки, приведены в приложении 1. Анализ паттернов, а также картин распределения температур по сечению колеса в длительных режимах торможения (рисунок 3.7), показывает, что информативной зоной для осуществления теплового контроля колодочных тормозов является зона обода колеса. При этом располагать приемник ИК-излучения возможно как внутри пути, так и снаружи, однако при каждом из указанных вариантов необходимо учитывать время достижения контролируемыми поверхностями нагрева, пригодного для осуществления теплового контроля. Так, из приведенных паттернов видно, что для корректного контроля необходимо иметь временной интервал между началом торможения и началом процесса контроля не менее 2 минут. За это время температура внешних поверхностей обода колеса, не относящихся к поверхности катания, достигнет пригодных для контроля значений вследствие явления теплопроводности. Этот факт необходимо учитывать при определении мест размещения комплектов СТК.

Из рисунка 4.3 также видно, что в конце торможения тормозные колодки имеют значительно более высокие максимальные температуры, чем поверхность катания колеса. Причем композиционные тормозные колодки нагреваются значительно интенсивнее и охлаждаются медленнее, чем чугунные, вследствие низкого коэффициента теплопроводности полимерного композита. Попадание колодок в зону контроля может спровоцировать ложные тревожные показания СТК даже в кратковременных режимах торможения.

Определим наиболее рациональную зону теплового контроля колодочных тормозов на примере распространенной конструкции тележки грузового вагона 18-578 (рисунок 4.4).

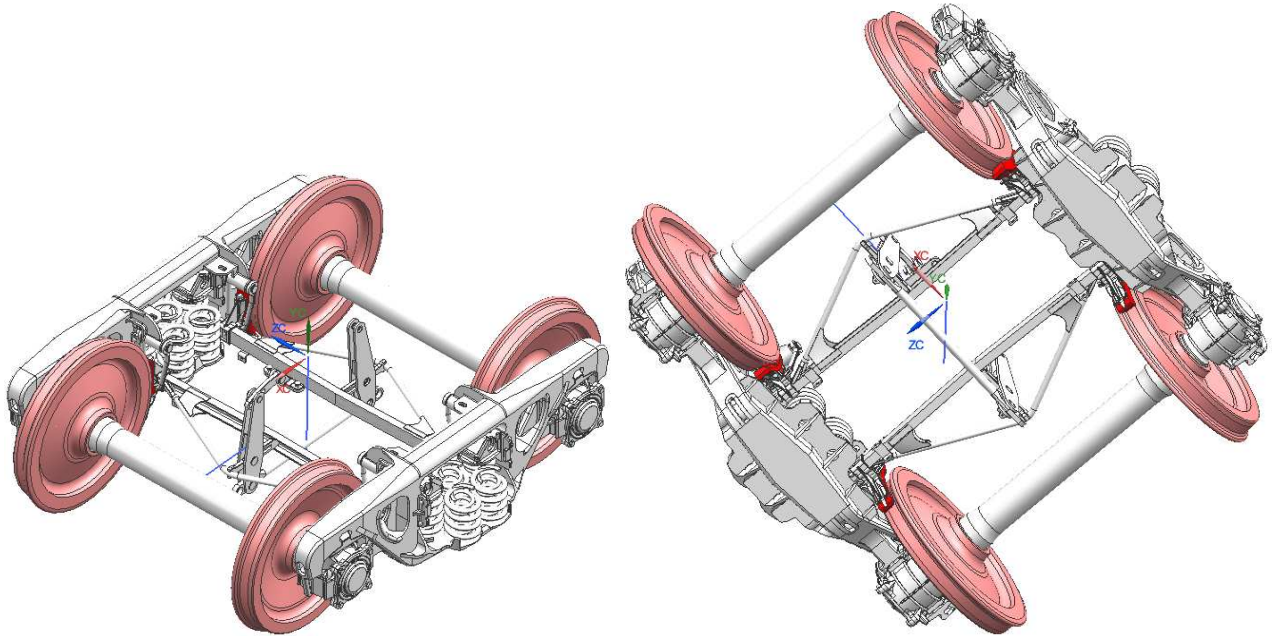


Рисунок 4.4 – Тележка грузового вагона типа 18-578 (надрессорная балка условно не показана)

Анализ конструкции тележки в совокупности с различными вариантами ориентации ИК-оптики позволил выявить следующие особенности. Ориентация ИК-оптики по варианту на рисунке 3.9, *a* позволяет контролировать нагрев поверхности катания, однако в случае неотпущенных тормозов в зону контроля попадает тормозная колодка (рисунок 4.5).

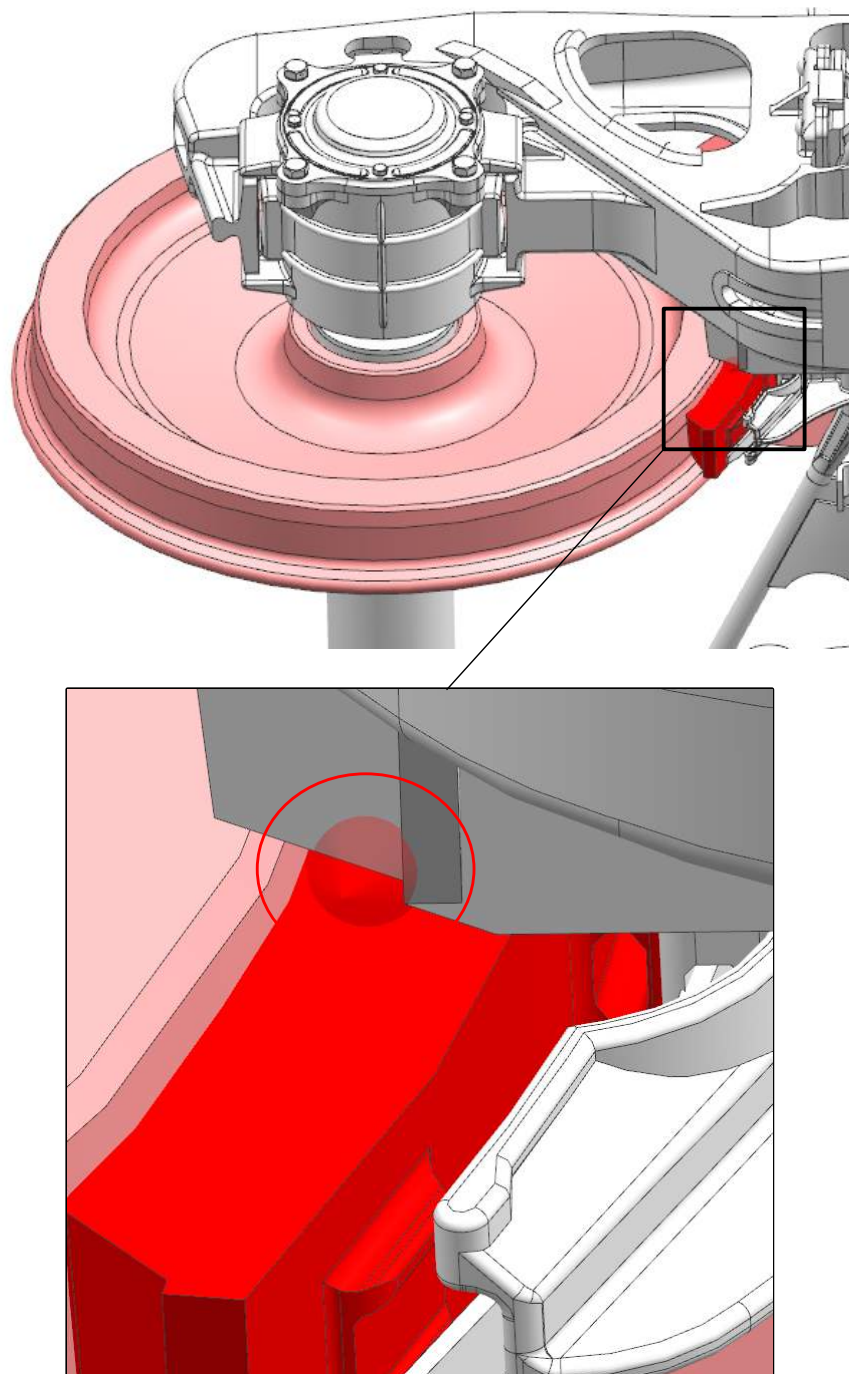


Рисунок 4.5 – Попадание в зону контроля тормозной колодки при ориентации ИК-оптики на ступицу колеса снаружи пути

При отпущенной колодке в зону контроля попадает только поверхность качения колеса, а тормозная колодка закрыта от сканирующего луча приемника элементами боковой рамы тележки.

При расположении ИК-оптики внутри пути и её ориентации на ступицу колеса тормозная колодка также попадает в зону контроля независимо от того, прижата она к колесу или нет (рисунок 4.6).

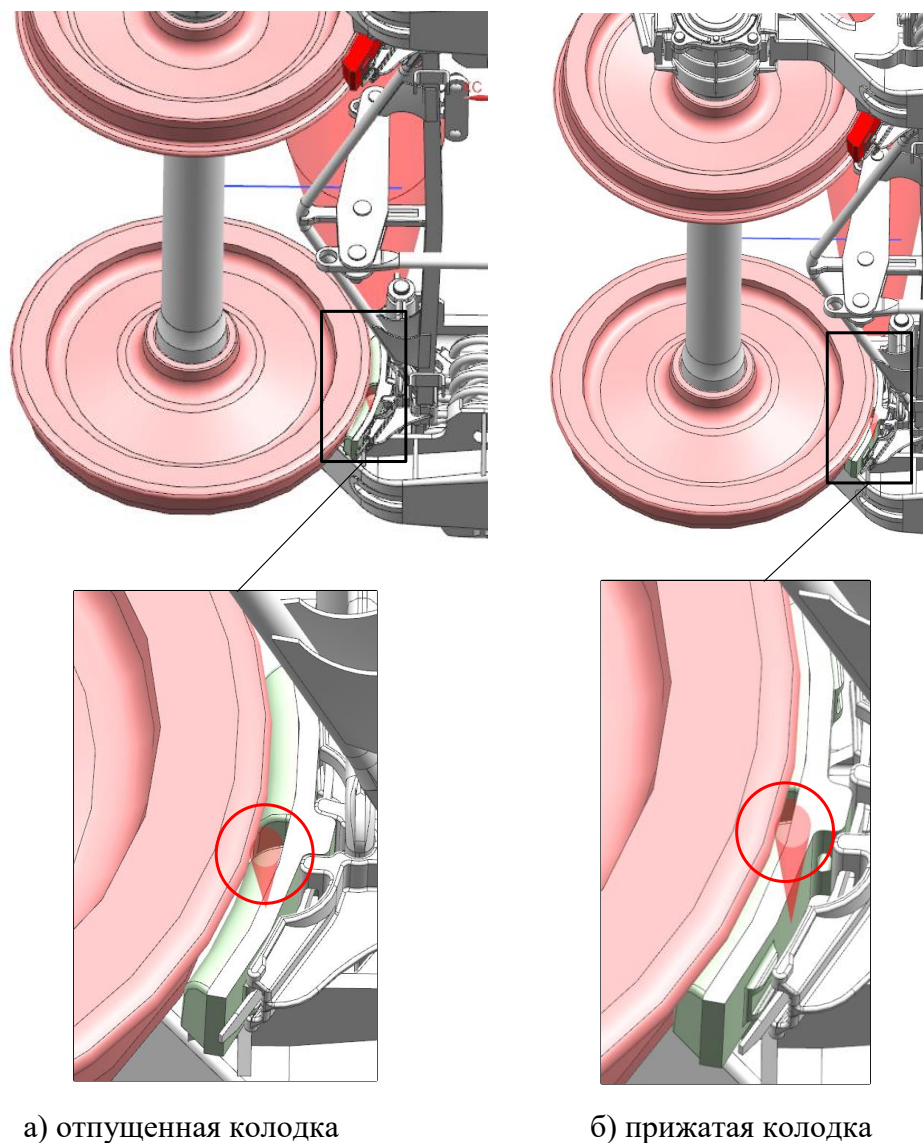


Рисунок 4.6 – Попадание в зону контроля тормозной колодки при ориентации ИК-оптики на ступицу колеса внутри пути

Резюмируя изложенное, из всего множества вариантов ориентации ИК-оптики на контролируемое колесо предлагается выделить наиболее рациональную зону теплового контроля (рисунок 4.7).

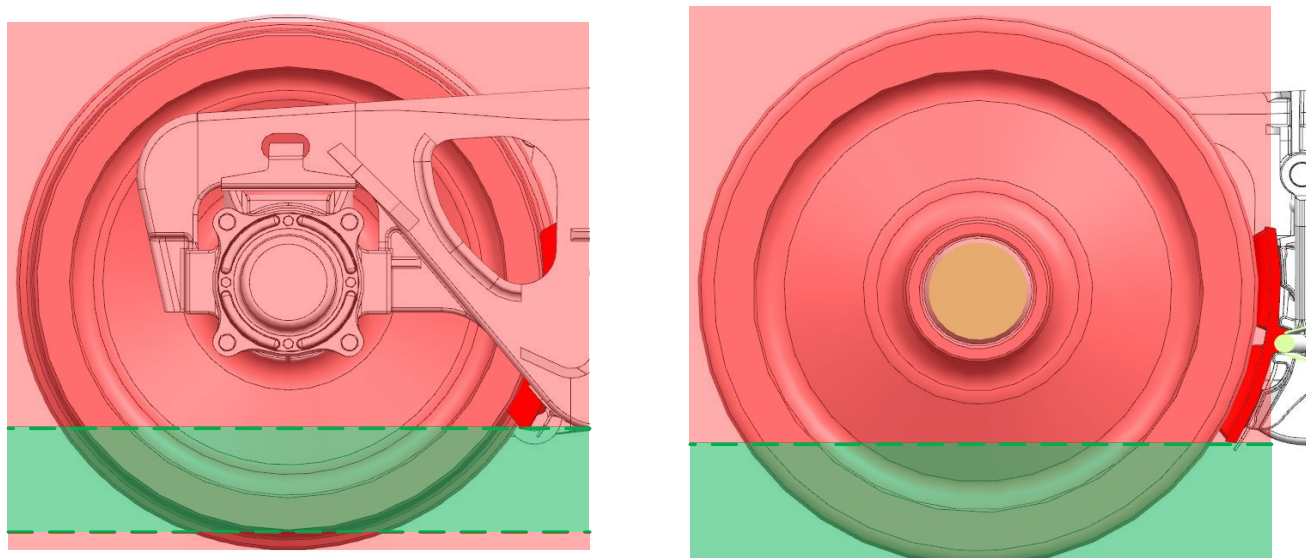


Рисунок 4.7 – Рекомендуемые к применению в СТК зоны колеса для теплового контроля колодочных тормозов (обозначены зеленым цветом)

Как видно из рисунка 4.7, приемник ИК-излучения рекомендуется ориентировать таким образом, чтобы в зону теплового контроля попадал только обод колеса и часть диска. Верхняя граница рекомендуемой зоны ограничена высотой расположения тормозной колодки, нижняя в случае расположения приемника:

- снаружи пути – уровнем головки рельса;
- внутри пути – нижней точкой гребня колеса.

Рекомендуемая зона может быть расширена за счет ориентации оптики на ступицу колеса в случае разработки алгоритмов отсеивания сигналов, получаемых при попадании в зону контроля колодки. На осциллограммах в этих случаях будут заметны явные признаки асимметрии сигналов (см. рисунок 3.15), рассмотренные ранее. На наш взгляд, рассмотренные случаи искажения сигналов и отклонений от нормальной параболической формы связаны с попаданием в зону контроля нагретых тормозных колодок. Таким образом, в отсутствие разработанных алгоритмов отсеивания искажений сигналов целесообразно ориентировать оптику в пределах зоны, рекомендуемой рисунком 4.7.

4.3 Выбор системы диагностических признаков, пороговых значений и разработка алгоритмов теплового контроля колодочных тормозов

Результаты моделирования нагрева колеса в различных режимах торможения (см. п. 3.1) показывают, что температура поверхности катания колеса в момент окончания торможения может достигать 260°C при кратковременном торможении и 650°C – при длительном. Как отмечают авторы работ [15; 16; 69], достижение колесом такой температуры свидетельствует о протекании структурных процессов, связанных с переходом феррито-цементных смесей в аустенит, в результате чего на поверхности катания колеса образуется смесь мартенсита с феррито-цементитной смесью, которая характеризуется повышенной твердостью и хрупкостью, пониженной пластичностью. Кроме того, при достижении таких температур значительно снижаются механические характеристики стали. Это создает условия для образования микротрещин на поверхности катания при восприятии колесом динамических воздействий и способствует возникновению вышербин. Кроме того, как отмечает автор той же работы, уже при достижении колесом максимальной температуры 341°C при длительном торможении наблюдаются значительные деформации колеса (расстояние между внутренними поверхностями гребней колес уменьшается на 5,2 мм). С учетом уширения колеи в кривых участках пути подобные деформации колеса могут привести к негативным последствиям в плане безопасности функционирования транспорта.

Учитывая изложенное, в общем случае нормальным температурным режимом работы колеса при осуществлении колодочного торможения следует считать диапазон относительной температуры колеса от 0 до 260°C , а превышение максимальной относительной температуры колеса значения 340°C – аномальным. Исходя из этих соображений, предлагается использовать полученные в результате моделирования значения в качестве пороговых значений контроля и назначить по аналогии с системами КТСМ три уровня тревожной сигнализации по нагреву колёс: Тревога 0, Тревога 1, Тревога 2 (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Уровни тревожной сигнализации по нагреву колёс (абсолютные температуры)

Вид тревожной сигнализации	Пороговое значение контроля, °С
Тревога 2	340
Тревога 1	260
Тревога 0	–

Как видно из таблицы 4.6, уровни тревожной сигнализации предлагается назначать по аналогии с [92], ориентируясь на полученные в настоящей работе результаты моделирования нагрева колеса. В некоторых случаях необходимо учитывать условия движения поезда и контролируемых участков пути, к примеру:

- поезд, проходящий пункт контроля, может находиться в процессе торможения, в связи с чем возможно значительное повышение температуры колёс,
- пункт контроля находится на спуске и контролируемый поезд совершил остановочное торможение после его проследования, что также приведет к повышению температур колёс относительно равнинной местности при прочих равных условиях.

Прохождение таких участков пути или возникновение таких условий движения поезда, очевидно, будет связано с ростом тепловой нагрузки на фрикционный узел, что неминуемо приведет к росту температур колёс и вероятному превышению принятых в таблице 4.6 пороговых значений. Тем не менее, полученное тревожное показание от СТК о неработоспособности колодочного тормоза не будет соответствовать действительности, а отцепка вагона повлечет за собой ненужные задержки и рост эксплуатационных затрат. Таким образом, с точки зрения оценки работоспособности колодочного тормоза целесообразно производить коррекцию пороговых значений контроля с учетом темпа замедления поезда (отрицательного ускорения) и уклона контролируемого участка пути. Коррекцию пороговых значений по этим признакам целесообразно объединить с целью упрощения алгоритмов теплового контроля и назначить повышенные пороги (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Коррекция пороговых значений контроля в зависимости от темпа замедления поезда и уклона пути

Вид тревожной сигнализации	Замедление $> 0,3 \text{ м/с}^2$ или $6\text{‰} \leq i \leq 12\text{‰}$	Замедление $> 0,6 \text{ м/с}^2$ или $12\text{‰} < i \leq 20\text{‰}$
	Коррекция, °С	
Тревога 2	плюс 45	плюс 70
Тревога 1		
Тревога 0	–	–

Корректирующие пороговые значения контроля в таблице 4.7 назначены, исходя из результатов численного моделирования, проводившегося для оценки влияния уклона пути на нагрев колеса (см. п. 3.1.2). Если вернуться к рисункам 3.2 и 3.3, видим, что разница между максимальными температурами поверхности катания колеса при сравнении по уклонам 0 и 20‰ составляет порядка 70°C, по уклонам 0 и 12‰ – около 45°C. Полученные значения коррекции порогов контроля коррелируют с аналогичными значениями, принимаемыми зарубежными стандартами [92], [119], [103].

При разработке алгоритмов и выборе пороговых значений теплового контроля целесообразно использовать результаты статистического исследования мониторинга нагрева колёс в эксплуатационных условиях, полученные в п. 3.3. Согласно полученным результатам распределение температур колёс в поезде стремится к нормальному распределению, для которого справедливо правило трех сигм. Значит, колёса, температуры которых превысили порог трех среднеквадратичных отклонений от среднего значения температур колёс по поезду, следует отнести к чрезмерно нагретым. При этом конкретное пороговое значение контроля должно быть рассчитано, исходя из вычисленной средней относительной температуры колёс по контролируемой стороне поезда. Верхнее пороговое значение контроля (по показанию Тревога 2) целесообразно ограничить нормальным уровнем нагрева, определенным по результатам численного моделирования (260°C). Превышение температурой колеса этого предела в совокупности с фактом значительного её превышения над средней температурой колёс состава будет свидетельствовать о неполадках в работе колодочного тормоза. Пороговые значения контроля для описанного подхода приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Уровни тревожной сигнализации по нагреву колёс (относительные температуры)

Вид тревожной сигнализации	Пороговое значение контроля, °С	Средняя относительная температура колёс по одной стороне поезда, °С
Тревога 2	260	85
Тревога 1	200	
Тревога 0	150	

Назначенные в таблице 4.8 пороговые значения контроля соответствуют по уровням среднеквадратических отклонений от среднего значения относительной температуры колёс по одной стороне поезда: 2σ (Тревога 0), $2,5\sigma$ (Тревога 1) и 3σ (Тревога 2).

Применение вышеперечисленных пороговых значений (таблицы 4.6 – 4.8) и правила трех сигм возможно при разработке алгоритмов обнаружения «горячих» колёс. При обнаружении «холодных» колёс в дополнение к правилу трех сигм необходимо учитывать, что контролируемый поезд должен находиться в процессе торможения, либо процесс его торможения должен быть закончен незадолго до прохождения пункта теплового контроля. Значит, необходимо назначить пороговое значение теплового контроля по достижению средней температуры колёс по стороне поезда, при котором можно сделать однозначное заключение о принадлежности поезда к одному из двух классов:

- поезд находится в состоянии торможения, или торможение закончено незадолго до начала контроля (класс 1);
- поезд не находится в состоянии торможения (класс 2).

Рекомендовать пороговое значение средней температуры колёс по стороне поезда, при достижении которой поезд можно отнести классу 1, можно с учетом следующих соображений:

- процесс контроля необходимо начинать не менее, чем через 2 минуты после начала торможения (см. п. 4.2);
- исходя из результатов моделирования (см. рисунок 3.2), наименьшей температурой для выполнения первого условия является температура порядка 95°C ;

– исходя из результатов анализа зарубежных стандартов СТК колодочных тормозов, в которых рассматриваемое пороговое значение принимается равным 200°F, что примерно соответствует 93,3°C.

Учитывая изложенное, рекомендуется для применения при разработке алгоритмов обнаружения «холодных» колёс, использовать пороговое значение средней температуры колёс по стороне поезда 90°C. С учетом правила трех сигм температура колеса, которое следует отнести к «холодным», не должна превышать 30% от средней температуры колёс по стороне поезда. Условимся, что тревога по «холодному» колесу выделена в отдельный вид тревожной сигнализации («Тревога Д»).

Проведенные исследования по выбору пороговых значений теплового контроля колодочных тормозов показали, что целесообразна разработка алгоритмов обнаружения «горячих» и «холодных» колёс. Причем:

- при обнаружении «горячих» колёс возможна оценка работоспособности тормозного оборудования как по абсолютной температуре колеса, так и в сравнении её со средней температурой колёс по контролируемой стороне поезда;
- для обнаружения «холодных» колёс необходимо выполнение двух условий: поезд должен быть однозначно отнесен к классу 1 (находится в процессе торможения) и температура колеса должна находиться за интервалом трех среднеквадратичных отклонений от среднего значения температур колёс поезда.

Подбор системы диагностических признаков, отражающих техническое состояние и достоверно характеризующих работоспособность колодочных тормозов, является одной из основных задач при проектировании СТК и должен базироваться на вполне определенных устанавливаемых заказчиком СТК требованиях. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований нагрева колеса при различных режимах торможения, процесса теплового контроля колодочных тормозов, результатах выбора наиболее информативной зоны на колесе и пороговых значений теплового контроля, и с учетом исследований и разработок отечественных разработчиков СТК буксовых узлов (Лозинский С.П., Трестман Е.Е.,

Самодуров В.И., Образцов В.Л., Миронов А.А.), разработан перечень диагностических признаков, применение которых возможно при эксплуатации СТК колодочных тормозов (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Перечень диагностических признаков, применение которых возможно при эксплуатации СТК колодочных тормозов

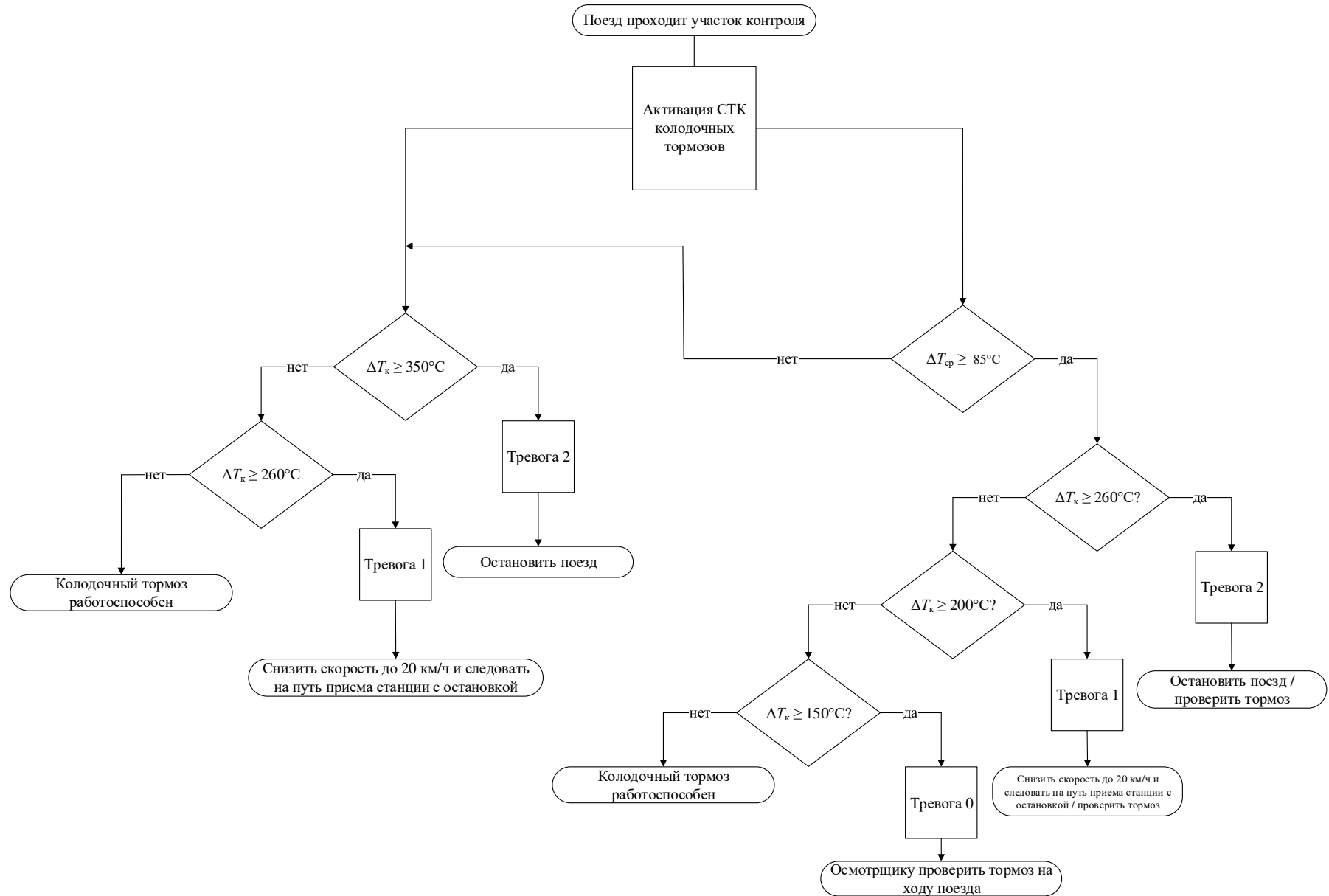
Признак	Обозначение	Математическое выражение
1 Амплитуда сигнала колеса	P_1	ΔT
2 Разность амплитуд сигналов двух соседних колёс	P_2	$\Delta T_{i+1} - \Delta T_i$
3 Разность амплитуд сигналов колёс одной оси	P_3	$\Delta T_{in} - \Delta T_{in}$
4 Сумма амплитуд сигналов двух соседних колёс	P_4	$\Delta T_{i+1} + \Delta T_i$
5 Отношение амплитуд сигналов двух соседних колёс	P_5	$\frac{\Delta T_{i+1}}{\Delta T_i}$
6 Отношение амплитуд сигналов колёс одной оси	P_6	$\frac{\Delta T_{in}}{\Delta T_{in}}$
7 Разность амплитуд сигналов и средней амплитуды сигналов колёс вагона	P_7	$\Delta T - \Delta T_{срв}$
8 Сумма амплитуд сигналов колёс одного вагона	P_8	$\Sigma \Delta T$
9 Отношение амплитуд сигналов колёс к средней амплитуде сигналов колёс вагона	P_9	$\frac{\Delta T_i}{\Delta T_{срв}}$
10 Отношение амплитуд сигналов колёс к средней амплитуде сигналов колёс вагона, определенной без амплитуды максимального сигнала	P_{10}	$\frac{\Delta T_i}{\Delta * T_{срв}}$
11 Отношение амплитуд сигналов колёс к средней амплитуде сигналов остальных букс с одной стороны вагона	P_{11}	$\frac{\Delta T_i}{\Delta T_{срв_ст}}$
12 Приращение амплитуды сигнала одного и того же колеса на заданном участке пути	P_{12}	$\Delta T_{iA} - \Delta T_{iB}$
13 Темп роста амплитуды сигнала колеса на заданном участке пути	P_{13}	$\frac{\Delta T_{iA} - \Delta T_{iB}}{\Delta t_{iAB}}$
14 Приращение отношения (11) на заданном участке пути (между постами контроля)	P_{14}	$\frac{\Delta T_{iA}}{\Delta T_{срв_ст}} - \frac{\Delta T_{iB}}{\Delta T_{срв_ст}}$
15 Разность температуры колеса и температуры окружающей среды (относительная температура колеса)	P_{15}	$\Delta T_k = T_k - T_{о.с.}$
16 Разность температур колёс одной оси	P_{16}	$Rt = T_{лев} - T_{прав}$

Признак	Обозначение	Математическое выражение
17 Разность температуры колеса и среднего значения температур остальных колёс по стороне вагона	Π_{17}	$Rt_{ст} = T_i - T_{cp}$
18 Разность средней температуры колёс по стороне поезда и температуры окружающей среды (средняя относительная температура колёс по стороне поезда)	Π_{18}	$\Delta T_{cp} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \right) - T_{o.c.}$
19 Разность относительной температуры колеса и средней относительной температуры остальных колёс по стороне поезда	Π_{19}	$\Delta T_k - \Delta T_{cp}$
20 Отношение относительной температуры колеса к средней относительной температуре колёс по стороне поезда	Π_{20}	$\frac{\Delta T_k}{\Delta T_{cp}}$

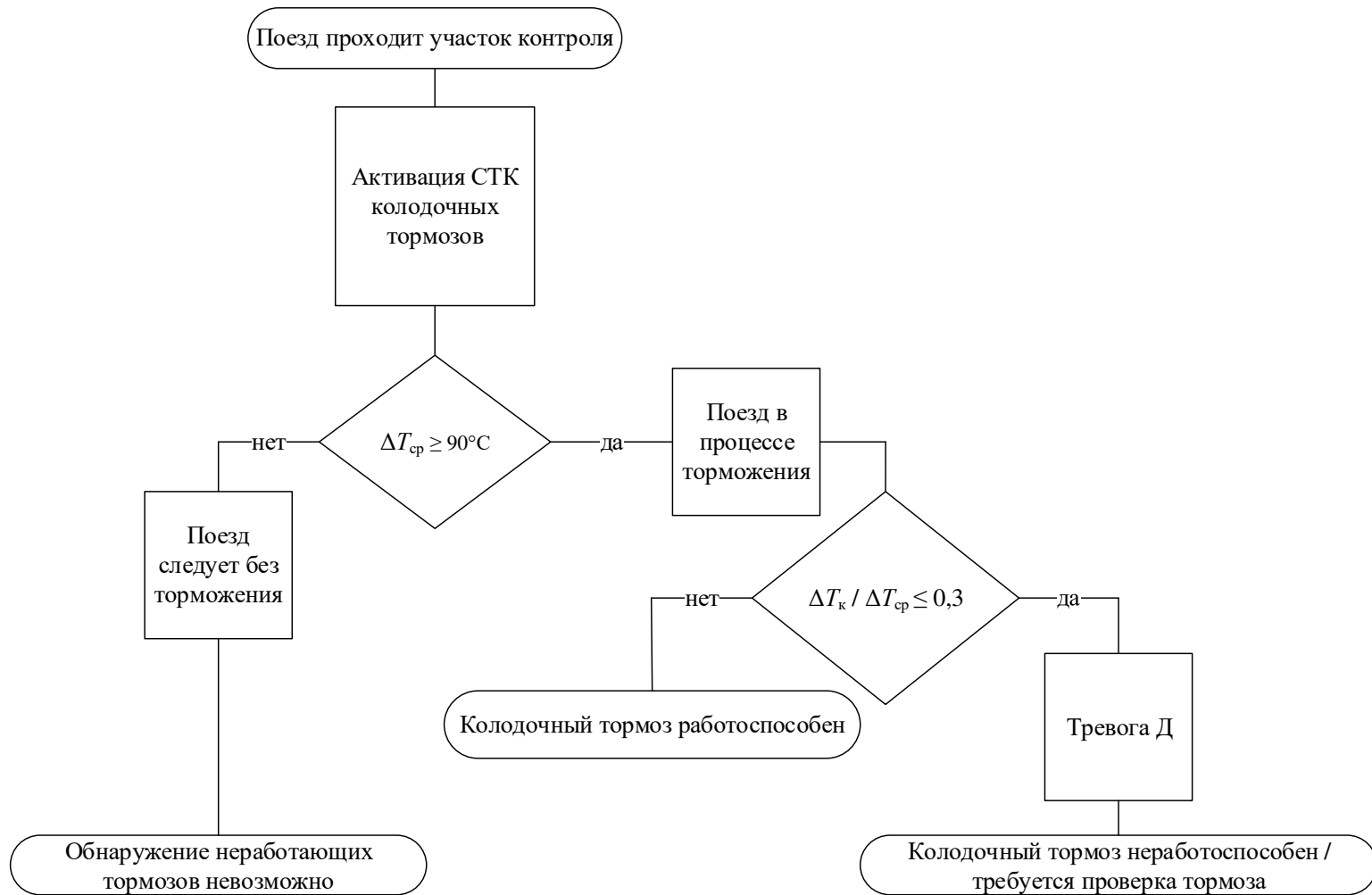
Как показали исследования по выбору пороговых значений теплового контроля, при осуществлении оценки работоспособности колодочных тормозов по нагреву колёс необходимо применять диагностические признаки, которые характеризуют не только нагрев отдельно взятого колеса, но и нагрев колёс в целом по контролируемой стороне поезда. В этой связи применение признаков и алгоритмов, основанных на температурах колёс в рамках одного вагона или тележки является малоинформативным, поскольку с увеличением размера формируемой выборки возрастает достоверность результатов контроля. Признаки, основанные на оценке нагрева колёс в динамике, с точки зрения оценки работоспособности колодочного тормоза также представляются малоинформативными, поскольку пункты контроля располагаются на расстояниях значительно больших, чем длины тормозных путей поездов. Однако, стоит отметить, что применение этих признаков возможно при организации пунктов контроля на затяжных спусках, либо при создании специализированных систем по оценке эффективности тормозного оборудования. Исходя из этого, а также ориентируясь на результаты проведенных исследований по выбору пороговых значений контроля, предлагается использовать систему из 5 диагностических признаков Π_{15} , Π_{16} , Π_{18} , Π_{19} , Π_{20} .

Признак Π_{15} в целом является достаточно информативным и в некоторой мере самодостаточным признаком, благодаря простоте и очевидности которого

имеется возможность эффективного обнаружения чрезмерно нагретых колёс. Признак P_{18} характеризует общую картину нагрева колёс в контролируемом поезде. Его целесообразно использовать при проведении процедуры отнесения поезда к тому или иному классу и в составе более сложных алгоритмов при обнаружении как чрезмерно, так и недостаточно нагретых колёс. Признак P_{20} предназначен для применения в алгоритмах обнаружения «холодных» колёс, однако его можно применять и для обнаружения «горячих» колёс. Его применение должно быть основано на использовании гипотезы о нормальном распределении температур колёс в поезде. В соответствии с принятой системой диагностических признаков и рекомендованными пороговыми значениями разработаны алгоритмы обнаружения «горячих» и «холодных» колёс для применения в СТК колодочных тормозов (рисунок 4.8).



а) «горячих» колёс



б) «холодных» колёс

Рисунок 4.8 – Алгоритмы обнаружения колёс с аномальными температурами

Указанные в алгоритмах на рисунке 4.8 пороговые значения теплового контроля при обнаружении «горячих» колёс следует корректировать в большую сторону в соответствии с рекомендуемыми корректировочными значениями в таблице 4.9.

4.4 Выводы по главе 4

1 Обобщенный анализ технической и нормативной информации об СТК колодочных тормозов, применяемых за рубежом, показал достаточное количество их технических реализаций. Основные параметры СТК, пороговые значения, состав систем диагностических признаков в целом мало отличаются друг от друга. В настоящей главе эти параметры качественно подтверждены результатами численного моделирования и обоснованы для применения в условиях Российских железных дорог.

2 Исследования по выбору наиболее информативной зоны на колесе для осуществления теплового контроля колодочных тормозов показали, что наиболее рациональной является ориентация ИК-оптики в пространство, верхняя плоскость которого ограничена высотой расположения тормозной колодки, а нижняя – уровнем головки рельса или нижней точкой гребня колеса в зависимости от расположения приемника ИК-излучения. Сделан вывод о том, что рекомендуемая зона может быть расширена за счет ориентации оптики на ступицу колеса в случае разработки алгоритмов отсеивания сигналов, получаемых при попадании в зону контроля тормозной колодки. На осциллограммах в этих случаях будут заметны явные признаки асимметрии сигналов.

3 На основе результатов численного моделирования, опыта реализации СТК буксовых узлов отечественными учеными и стандартов проектирования СТК зарубежных стран обоснован выбор рациональных диагностических признаков, пороговых значений и разработаны алгоритмы теплового контроля колодочных тормозов.

4 Установлено, что применение СТК теплового контроля колодочных тормозов возможно для решения целого ряда задач, связанных с оценкой работоспособности тормозов и эффективности процесса торможения. В совокупности с представленными в настоящей работе исследованиями по выбору информативной зоны на колесе, пороговых значений, системы диагностических признаков и алгоритмов теплового контроля применение СТК колодочных тормозов позволят своевременно обнаруживать неполадки тормозных систем по нагреву колёс, в конечном итоге оказывая положительное влияние на безопасность функционирования железнодорожного транспорта и снижая эксплуатационные затраты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Анализ экспериментальных и теоретических исследований тепловых процессов при колодочном торможении показал, что данные о степени нагрева колеса при колодочном торможении противоречивы. При сходных режимах торможения исследователи получали различные результаты. Основная часть теоретических исследований базируется на плоских осесимметричных моделях. Это приводит к тому, что описание работы колодочного тормоза не является достаточно точным с количественной и качественной точек зрения, поскольку при математическом описании процесса теплового контроля необходимо располагать данными о температурном распределении не только в сечении колеса, но и на его внешних поверхностях, где возможен контроль средствами бесконтактной тепловой диагностики. Таким образом, выявлена необходимость разработки комплексной имитационной модели теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава.

2 Разработана компьютерная реализация комплексной диагностической модели бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов в виде связанных блоков на основе методов математического моделирования.

3 В рамках комплексной модели бесконтактного теплового контроля разработана компьютерная модель нагрева колеса грузового вагона на основе метода конечных элементов, отличительными особенностями которой являются

- разработанные детализированные конечно-элементные модели колеса, стандартной чугуновой и композиционной тормозных колодок;
- учет геометрии тела, физико-механических свойств материала-наполнителя тормозной колодки, вращательного движения колеса при осуществлении процесса торможения, что снимает принятое в других работах допущение о подводе тепловой нагрузки к колесу по всей площади обода;
- возможность получения полноразмерных картин температурных распределений в колесе и тормозной колодке при реализации различных режимов торможения и заклинивания колеса, что является критически важным при моделировании процесса бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов.

4 На основе применения методов аналитической геометрии и механики движения систем связанных тел разработана компьютерная модель определения траектории сканирования и вычисления уровня сигнала, получаемого приемником инфракрасного излучения, при осуществлении теплового контроля колодочных тормозов. Отличительной особенностью модели является возможность задания в качестве исходных данных температурного распределения, получаемого при помощи модели нагрева, и автоматизации процесса моделирования теплового контроля. Модель может быть использована для оценки формы и уровня сигнала при различных вариантах ориентации инфракрасной оптики на объект контроля.

5 Проведено компьютерное моделирование нагрева колёс в различных режимах торможения и при заклинивании, позволившее сделать вывод о том, что наибольшее влияние на нагрев колеса оказывают скорость начала торможения, износ колеса, режим воздухораспределителя, материал-наполнитель колодки и продолжительность торможения. Результаты моделирования показывают, что температура колеса при колодочном торможении в штатных кратковременных режимах может достигать 260°C (композиционная колодка) на поверхности катания колеса, в длительных режимах до 20 минут – более 650°C с прогревом металла по всему сечению колеса.

6 Моделирование нагрева заклиненного колеса показало, что при этом процессе происходит интенсивный нагрев колеса до высоких температур (640°C) за относительно небольшой промежуток времени с последующим быстрым охлаждением и падением температуры колеса до температуры окружающего воздуха менее чем за 5 минут.

7 Проведено компьютерное моделирование процесса осуществления бесконтактного теплового контроля на основе разработанной модели при различных вариантах ориентации инфракрасной оптики на объект контроля. Результаты моделирования показали существенные различия в получаемых СТК сигналах при изменении ориентации оптики. Для всех рассмотренных случаев характерно сохранение параболической формы сигнала с изменением амплитудных участков, характеризующих сканирование различных составных частей колеса. Установлено, что

при ориентации оптики с внешней стороны колеса, в зону контроля попадает поверхность катания колеса, что позволяет регистрировать максимальную температуру колеса. Ориентация ИК-оптики на колесо с его внутренней стороны позволяет исключить возможное ложное срабатывание СТК при экстренном торможении поезда, а также получить приблизительное представление о максимальной температуре поверхности катания колеса на основании температуры гребня.

8 С использованием различной аппаратуры регистрации температур колёс проведен мониторинг нагрева колёс в реальных условиях эксплуатации. Так с использованием тепловизора Fluke Ti450 проведена тепловизионная съемка движущихся грузовых составов для сравнения действительных максимальных температур колёс со значениями, получаемыми средствами теплового контроля. Результаты анализа полученных данных позволили сделать вывод о качественной сходимости проводимых измерений с результатами съемки.

9 На основе данных о нагреве колёс в реальных условиях эксплуатации, полученных в настоящей работе, результатов экспериментальных исследований в других работах и аналитических расчетов по определению температурных полей в колёсах подвижного состава при колодочном торможении подтверждена адекватность разработанных компьютерных моделей. Разница между результатами численного моделирования и экспериментальных исследований составляет не более 5%, аналитических расчетов – не более 15%.

10 Обобщенный анализ технической и нормативной информации об СТК колодочных тормозов, применяемых за рубежом, показал достаточное количество их технических реализаций. Основные параметры СТК, пороговые значения, состав систем диагностических признаков в целом мало отличаются друг от друга. В настоящей работе эти параметры качественно подтверждены результатами численного моделирования и обоснованы для применения в условиях Российских железных дорог.

11 Исследования по выбору наиболее информативной зоны на колесе для осуществления теплового контроля колодочных тормозов показали, что наиболее рациональной является ориентация ИК-оптики в пространство, верхняя плоскость

которого ограничена высотой расположения тормозной колодки, а нижняя – уровнем головки рельса или нижней точкой гребня колеса в зависимости от расположения приемника ИК-излучения. Сделан вывод о том, что рекомендуемая зона может быть расширена за счет ориентации оптики на ступицу колеса в случае разработки алгоритмов отсеивания сигналов, получаемых при попадании в зону контроля тормозной колодки. На осциллограммах в этих случаях будут заметны явные признаки асимметрии сигналов.

12 На основе результатов численного моделирования, опыта реализации СТК буксовых узлов отечественными учеными и стандартов проектирования СТК зарубежных стран обоснован выбор рациональных диагностических признаков, пороговых значений и разработаны алгоритмы теплового контроля колодочных тормозов.

13 Установлено, что применение СТК теплового контроля колодочных тормозов возможно для решения целого ряда задач, связанных с оценкой работоспособности тормозов и эффективности процесса торможения. В совокупности с представленными в настоящей работе исследованиями по выбору информативной зоны на колесе, пороговых значений, системы диагностических признаков и алгоритмов теплового контроля применение СТК колодочных тормозов позволят своевременно обнаруживать неполадки тормозных систем по нагреву колёс, в конечном итоге оказывая положительное влияние на безопасность функционирования железнодорожного транспорта и снижая эксплуатационные затраты.

Перспективы дальнейшего развития темы связаны с углублением представлений о характере и степени нагрева колёс при колодочном торможении с точки зрения учёта условий окружающей среды, в т.ч. погодных условий, что создаст предпосылки для уточнения пороговых значений контроля; созданием уточненной математической модели, описывающей работу средств бесконтактного теплового контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.Г. Аппаратура обнаружения перегретых букс ПОНАБ-3 / А.Г. Алексеев, С.Н. Лозинский // Автоматика, телемеханика и связь. – 1974. – № 10. – С. 5-8.
2. Асташкевич Б.М. Исследование эксплуатационных дефектов фрикционного сопряжения тормозной колодки с колесом вагона / Б.М. Асташкевич // Вестник ВНИИЖТ. – 2004. – № 4. – С. 35-39.
3. Ахметзянов М.Х. Термонапряженное состояние вагонного колеса при интенсивном торможении / М.Х. Ахметзянов, С.П. Васильев, О.Е. Ключко // Экспериментальные и расчетные методы строит. мех. – Новосибирск: Сиб. гос. акад. путей сообщ., 1997. – С. 4-11.
4. Балакин В.А. Расчет температурных полей в дисковом тормозе железнодорожного подвижного состава / В.А. Балакин, Э.И. Галай // Трение и износ. – 1998. – № 3. – С. 323-330.
5. Влияние подогрева при наплавке цельнокатаных колес вагонов на остаточные напряжения и деформации / С.Н. Киселев [и др.]. – 1995. – № 12. – С. 3-7.
6. Вуколов Л.А. Сравнительные фрикционные характеристики металлокерамических и полимерных композиционных тормозных колодок / Л.А. Вуколов, Жаров, В.А. // Вестник ВНИИЖТ. – 1999. – № 4. – С. 19-24.
7. Галай Е.Э. Нагрев колес грузовых вагонов при запуске тормоза / Е.Э. Галай // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 4.
8. Глушко М.И. Разработки в области автотормозов / М.И. Глушко, А.Н. Антропов // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 5. – С. 41-45.
9. Глушко М.И. Оценка тормозной эффективности маневрового состава / М.И. Глушко // Локомотив. – 2010. – № 10.
10. ГОСТ 1205. Колодки чугунные, тормозные для вагонов и тендеров железных дорог широкой колеи. Конструкция и основные размеры. – М.: Издательство стандартов, 73. – 6 с.

11. ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2011. – 34 с.
12. Григорьев И.С. Справочник физических величин / И.С. Григорьев. – 1991.
13. Динамика тепловых процессов при различных режимах торможения грузовых вагонов / Ю.И. Матяш [и др.] // Транспорт. Транспортные и технологические машины. – 2014. – № 2. – С. 29-33.
14. Ефимов Р.А. Анализ кинетики тепловых процессов и структурных превращений в цельнокатаных колесах в процессе эксплуатации / Р.А. Ефимов, Д.О. Миронов, М.В. Когут // Труды Тринадцатой научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МГУПС (МИИТ), 2012. – С. VII-2-VII-3.
15. Ефимов Р.А. Моделирование контактного взаимодействия в системе «колесо - рельс» / Р.А. Ефимов // Труды научно-практической конференции «Наука МИИТа - транспорту». – 2013. – С. IV-77.
16. Ефимов Р.А. Оценка влияния теплового нагружения цельнокатаных колес при торможении на безопасность движения / Р.А. Ефимов // Труды научно-практической конференции «Наука МИИТа - транспорту». – М.: МГУПС (МИИТ), 2012. – С. IV-3-IV-4.
17. Ефимов Р.А. Оценка ресурса цельнокатаного колеса на основе анализа текущего состояния / Р.А. Ефимов // Труды научно-практической конференции «Наука МИИТа - транспорту». – 2011. – С. IV-53-IV-54.
18. Ефимов Р.А. Сравнительный анализ деформаций цельнокатаных колес с различной формой диска в результате длительного торможения / Р.А. Ефимов // Труды X Международной научно-практической конференции «Trans-Mech-Art-Chem». – 2014. – С. 1-116-1-118.
19. Жаров А.И. Температуры на пятнах контакта системы «колодка- колесо - рельс» при торможении экипажа / А.И. Жаров, С.Б. Курцев // Вестник ВНИИЖТ. – 2008. – № 3. – С. 34-39.
20. Жаров И.А. Приближенный расчет поверхностных температур системы «колодки - колесо - рельс» / И.А. Жаров, И.Н. Воронин, С.Б. Курцев // Трение и износ. – 2003. – № 2. – С. 144-152.

21. Жаров И.А. Расчет температурных полей вблизи пятен контакта пары «колесо - рельс» при качении со скольжением / И.А. Жаров, И.Н. Воронин // Трение и износ. – 2002. – № 1. – С. 27-34.
22. Жаров И.А. Расчет параметров начального периода торможения / И.А. Жаров, С.Б. Курцев, А.А. Кренделев // Железнодорожный транспорт на современном этапе развития. – 2013. – С. 93-99.
23. Жаров И.А. Методика расчета приповерхностных температур системы «колодка-колесо» в режиме экстренного торможения / И.А. Жаров // Трение и износ. – 2003. – № 4. – С. 383-390.
24. Жаров И.А. Обоснование требований к устройствам автоматического регулирования тормозной силы в зависимости от загрузки для моторвагонного подвижного состава / И.А. Жаров // Вестник ВНИИЖТ. – 2012. – № 5. – С. 49-55.
25. Жаров И.А. Проверка адекватности моделей трения и изнашивания на пятнах контакта колес и рельсов / И.А. Жаров // Трение и износ. – 2001. – № 5. – С. 487-495.
26. Жаров И.А. Расчет температур на пятне контакта колеса с рельсом при юзе и боксовании / И.А. Жаров // Трение и износ. – 2003. – № 3. – С. 248-259.
27. Жаров И.А. Зависимости коэффициента сцепления пары «колесо-рельс» от параметров контакта / И.А. Жаров, О.Г. Сааме, С.Б. Курцев // Трение и износ. – 2002. – № 6. – С. 611-618.
28. Жаров И.А. Учет формы колеса и теплоотвода в воздух при расчете приповерхностных температур системы «колодка - колесо - рельс» / И.А. Жаров // Трение и износ. – 2003. – № 5. – С. 477-485.
29. Захаров С.М. Оценка стабильности критериев состояния тележек грузовых вагонов / С.М. Захаров, И.А. Жаров, М.А. Марков // Вестник ВНИИЖТ. – 2000. – № 5. – С. 42-48.
30. Захаров С.М. Контакт-усталостные повреждения колес грузовых вагонов / С.М. Захаров. – М.: Интекст, 2004. – 160 с.
31. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Каширский Ю.В. – 2-е изд., доп. и испр. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

32. Иноземцев В.Г. Нормы и методы расчета автотормозов / В.Г. Иноземцев, П.Т. Гребенюк. – М.: Транспорт, 1971.

33. Иноземцев В.Г. Автоматические тормоза. Учебник для вузов ж.д.-транспорта / В.Г. Иноземцев, В.М. Казаринов, В.Ф. Ясенцев. – М.: Транспорт, 1981.

34. Киселев А.С. Разработка методов анализа и проектирования сварочной технологии на основе компьютерного моделирования термомодеформированного и структурного состояния сварных конструкций : дисс. ... докт. техн. наук : 05.03.06 / А.С. Киселев. – М., 1999. – 309 с.

35. Киселев С.Н. Бандажированные колеса локомотивов : монография / С.Н. Киселев. – Казань: Издательство «Печать-Сервис-XXI век», 2010. – 276 с.

36. Киселев С.Н. Напряженно-деформированное состояние и ресурс восстановленных наплавкой колес подвижного состава при малоцикловых эксплуатационных воздействиях / С.Н. Киселев, А.С. Киселев, Р.И. Зайнетдинов // Труды конференции «Восстановление и упрочнение деталей - современный эффективный способ повышения надежности машин». – 1997. – С. 12-13.

37. Киселев С.Н. Решение нелинейных задач нестационарной термоупругопластичности применительно к сварке и наплавке конструктивных элементов / С.Н. Киселев, А.С. Киселев, Г.Д. Кузьмина // Прикладная физика. – 1994. – № 3. – С. 8-11.

38. Киселев С.Н. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния цельнокатаных колес вагонов с различной формой диска при эксплуатационных нагрузках / С.Н. Киселев, А.В. Саврухин, А.Н. Неклюдов // Тяжелое машиностроение. – 2007. – № 11. – С. 26-30.

39. Контроль остаточных напряжений в цельнокатаных колесах, возникающих в процессе изготовления и эксплуатации, на основе компьютерного моделирования / С.Н. Киселев [и др.] // Контроль. Диагностика. – № 4. – С. 3-13.

40. Концепция развития средств диагностики подвижного состава на ходу поезда [Электронный ресурс]. – URL: http://www.pkbcv.ru/nts/docs_2019-06-04/00_Концепция_диагностика_3.4.pdf (дата обращения: 23.01.2020).

41. Кузьмина Г.Д. Совершенствование и обоснование технологии восстановления наплавкой гребней цельнокатаных колес вагонов на основе моделирования тепловых процессов и структурных превращений : дисс. ... канд. техн. наук : 05.03.06 / Г.Д. Кузьмина. – М., 1995. – 167 с.
42. Марков Д.П. Контактно-усталостные повреждения колес и рельсов / Д.П. Марков // Трение и износ. – 2001. – Т. 23. – № 4. – С. 437-447.
43. Марков Д.П. Трибология и ее применение на железнодорожном транспорте / Д.П. Марков. – тр. ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2007. – 408 с.
44. Мартынов Н.И. Некоторые особенности работы вагонных колес в современных условиях / Н.И. Мартынов, В.Н. Кривошеев, Е.П. Литовченко. – М.: ЦНИИТЭИ МПС, 1976. – 15 с.
45. Миронов, А.А. Диагностическая модель теплового контроля колес подвижного состава / А.А. Миронов, Д.Н. Салтыков, А.Э. Павлюков, П.И. Шалупина // Транспорт Урала. 2019. №3 (62). С. 36-40. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-36-40.
46. Миронов А.А. Научные и технические основы бесконтактного теплового контроля букс железнодорожного подвижного состава / А.А. Миронов. – 2009.
47. Миронов А.А. Совершенствование методов и средств бесконтактной тепловой диагностики букс подвижного состава / А.А. Миронов. – 2004.
48. Моисеенко М.А. Моделирование процессов теплообмена в дисковом тормозе скоростного вагона / М.А. Моисеенко // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – № 4 (32). – С. 65-70.
49. Моисеенко М.А. Решение задачи термоупругости с использованием переходных конечных элементов высокой точности / М.А. Моисеенко, Г.А. Неклюдова // Материалы XII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред». – М.: МАИ, 2006. – С. 121-124.
50. Моисеенко М.А. Моделирование температурных полей в деталях дискового тормоза / М.А. Моисеенко, В.И. Сакало // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2009. – № 2. – С. 57-64.

51. Напряженно-деформированное состояние колес вагонов с различной формой диска при термических воздействиях, связанных с торможением / С.Н. Киселев [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2008. – № 3. – С. 34-37.

52. Напряженно-деформированное состояние колес подвижного состава при малоцикловых технологических и эксплуатационных воздействиях / С.Н. Киселев [и др.] // Труды Второй межд. конференции «Актуальные проблемы железнодорожного транспорта». – М., 1996. – С. 92-93.

53. Неклюдова Г.А. Влияние условий торможения на распределение температурных полей в бандажных колесах локомотивов / Г.А. Неклюдова // Динам. и прочн. трансп. машин. – Брянск: Брян. ин.-т трансп. машиностр., 1994. – С. 56-61.

54. Неклюдова Г.А. Теоретический и экспериментальный анализ стационарных температурных полей и напряжений в обандаженных железнодорожных колесах при торможении / Г.А. Неклюдова, В.И. Сакало // Динам. и прочн. трансп. машин. – Брянск: Брян. ин.-т трансп. машиностр., 1994. – С. 46-55.

55. Образцов В.Л. Эволюция средств теплового контроля буксовых подшипников / В.Л. Образцов // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 10. – С. 46-53.

56. ОСТ 32.194-2002. Колодки тормозные чугунные для вагонов. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2002. – 15 с.

57. Павлюков, А.Э. Анализ взаимодействия колеса грузового вагона и чугунной тормозной ко-лодки / А.Э. Павлюков, Шалупина П.И. // Интеграция образовательной, научной и воспита-тельной деятельности в организациях общего и профессионального образования : м-лы IX Международ. науч.-практ. конф. / отв. за выпуск Н.Ф. Сирина, д-р техн. наук. — Екатеринбург : УрГУПС, 2017. — Вып. 9 (228). — 265 с.

58. Павлюков А.Э. Тормозные колодки грузовых вагонов: анализ повреждаемости и факторов, влияющих на создание тормозной силы / А.Э. Павлюков, О.В. Черепов, П.И. Шалупина // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4. – С. 4-11.

59. Павлюков А.Э. Моделирование работы системы теплового контроля колёс подвижного состава / А.Э. Павлюков, П.И. Шалупина. – 2019. – № Сборник

трудов конференции «Проблемы и перспективы развития вагоностроения». – С. 125-128.

60. Першин В.К. Моделирование тепловых режимов при фрикционном взаимодействии колеса и тормозной колодки / В.К. Першин, Л.А. Фишбейн // Транспорт Урала. – 2005. – № 1 (4). – С. 34-44.

61. Погорелов Д.Ю. Введение в моделирование динамики систем тел / Д.Ю. Погорелов. – 1997.

62. Полимеры в узлах трения машин и приборов: Справочник / Е.В. Зиновьев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1980. – 208 с.

63. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений / В.М. Попов. – М.: Энергия, 1971. – 216 с.

64. Правила тяговых расчетов для поездной работы: утверждены распоряжением ОАО «РЖД» 12.05.2016 г. №867р. – 2016.

65. Предупреждения термомеханических повреждений трибосистемы «колесо - рельс» при движении юзом / А.Л. Озябкин [и др.] // Вестник донского государственного технического университета. – 2011. – № 11. – С. 1405-1416.

66. Расчет и проектирование пневматической и механической частей тормозов вагонов : учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / П.С. Анисимов [и др.]; ред. П.С. Анисимов. – М.: Маршрут, 2005. – 248 с.

67. Саврухин А.В. Моделирование кинетики состояния колеса / А.В. Саврухин, А.Н. Неклюдов, Р.А. Ефимов // Мир транспорта. – 2012. – № 5. – С. 42-47.

68. Саврухин А.В. Моделирование тепловых нагрузений цельнокатаных колес / А.В. Саврухин, А.Н. Неклюдов, Р.А. Ефимов // Мир транспорта. – 2014. – № 5. – С. 22-37.

69. Саврухин А.В. Тепловые и деформационные процессы в ЦКК при длительном торможении / А.В. Саврухин, А.Н. Неклюдов, Р.А. Ефимов // Мир транспорта. – 2015. – № 2. – С. 44-52.

70. Саврухин А.В. Оценка влияния тепловых процессов при торможении на безопасность эксплуатации цельнокатаных колес / А.В. Саврухин, В. Терехов //

Труды Одиннадцатой научно- практической конференции «Безопасность движения поездов». – 2010. – С. 1-18-1-19.

71. Сакало А.В. Влияние температурных напряжений на накопление контактно-усталостных повреждений в колесе локомотива / А.В. Сакало, В.И. Сакало, С.Б. Томашевский // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 4. – С. 71-76.

72. Салтыков Д.Н. Моделирование нестационарного температурного поля цельнокатанного колеса при колодочном торможении / Д.Н. Салтыков, П.И. Шалупина // Материалы III всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте». – С. 34-40.

73. Салтыков Д.Н. О необходимости создания инфракрасных напольных систем для контроля работоспособности тормозов на железных дорогах России / Д.Н. Салтыков, П.И. Шалупина // Транспорт Урала. – 2017. – № 4. – С. 4-11.

74. Самодуров В.И. Прибор для бесконтактного обнаружения перегретых букс (ПОНАБ-2) / В.И. Самодуров, П.С. Шайдуров // Автоматика, телемеханика и связь. – 1972. – № 1. – С. 3-5.

75. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года: распоряжение Правительства РФ № 877-р. [Электронный ресурс]. – URL: www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13009 (дата обращения: 09.09.2017).

76. Тепловой расчет колес инновационных тележек моделей 18-9889 и 18-9890 / А.М. Орлова [и др.] // Вагоны и вагонное хозяйство.

77. Термомеханические повреждения колес вагонов и методы их устранения / И.С. Морозкин [и др.] // Вестник РГУПС. – 2008. – № 2. – С. 5-14.

78. Титарев Д.В. Моделирование нестационарных температурных полей и напряжений в дисках железнодорожных тормозов / Д.В. Титарев // Информационные технологии моделирования и управления. – 2007. – № 3 (37). – С. 331-338.

79. Титарев Д.В. Нестационарные температурные поля и напряжения в дисках тормозов железнодорожного подвижного состава / Д.В. Титарев, В.И. Сакало // Транспорт Урала. – 2007. – № 4 (15). – С. 74-79.

80. ТУ 38.114292-94. Колодки тормозные композиционные. – 1994.

81. ТУ 2571-028-00149386-2000. Колодка тормозная композиционная с сетчато-проволочным каркасом. – 2000.

82. Физические основы динамики тепловых процессов при различных режимах торможения / Ю.И. Матяш [и др.] // Межвуз. тем. сб. науч. тр. «Совершенствование технологии ремонта и технического обслуживания вагонов». – Омск, 2014. – С. 29-33.

83. Физическое и численное моделирование тепловых и деформационных полей в железнодорожном колесе при торможении / В.В. Муравьев [и др.] // Вопросы эксплуатации железнодорожного транспорта. – Новосибирск: Сиб. гос. акад. путей сообщ., 1997. – С. 136-145.

84. Цельнокатаные железнодорожные колеса. Изготовление, эксплуатация, восстановление, обеспечение надежности : монография / ред. С.Н. Киселев. – Казань: Издательство «Печать- Сервис-XXI век», 2009. – 265 с.

85. Шайдуров П.С. Установка для бесконтактного обнаружения греющихся букс (ПОНАБ) / П.С. Шайдуров, В.Г. Свалухин // Труды ЦНИИ МПС. – 1965. – № 289. – С. 87-97.

86. Шакина А.В. Разработка эффективной технологии получения вагонной тормозной колодки из металлокерамического фрикционного материала : Диссертация на соискание ученой степени / А.В. Шакина. – 2014. – 159 с.

87. Шакина А.В. Новые тормозные колодки повышенной износостойкости / А.В. Шакина, В.С. Фадеев, О.В. Штанов. – 2014. – № 4. – С. 42-44.

88. Шалупина П. И. Исследование процесса теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава методом имитационного моделирования // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. №4. С. 31-42. DOI: 10.30987//1999-8775-2020-4-31-42.

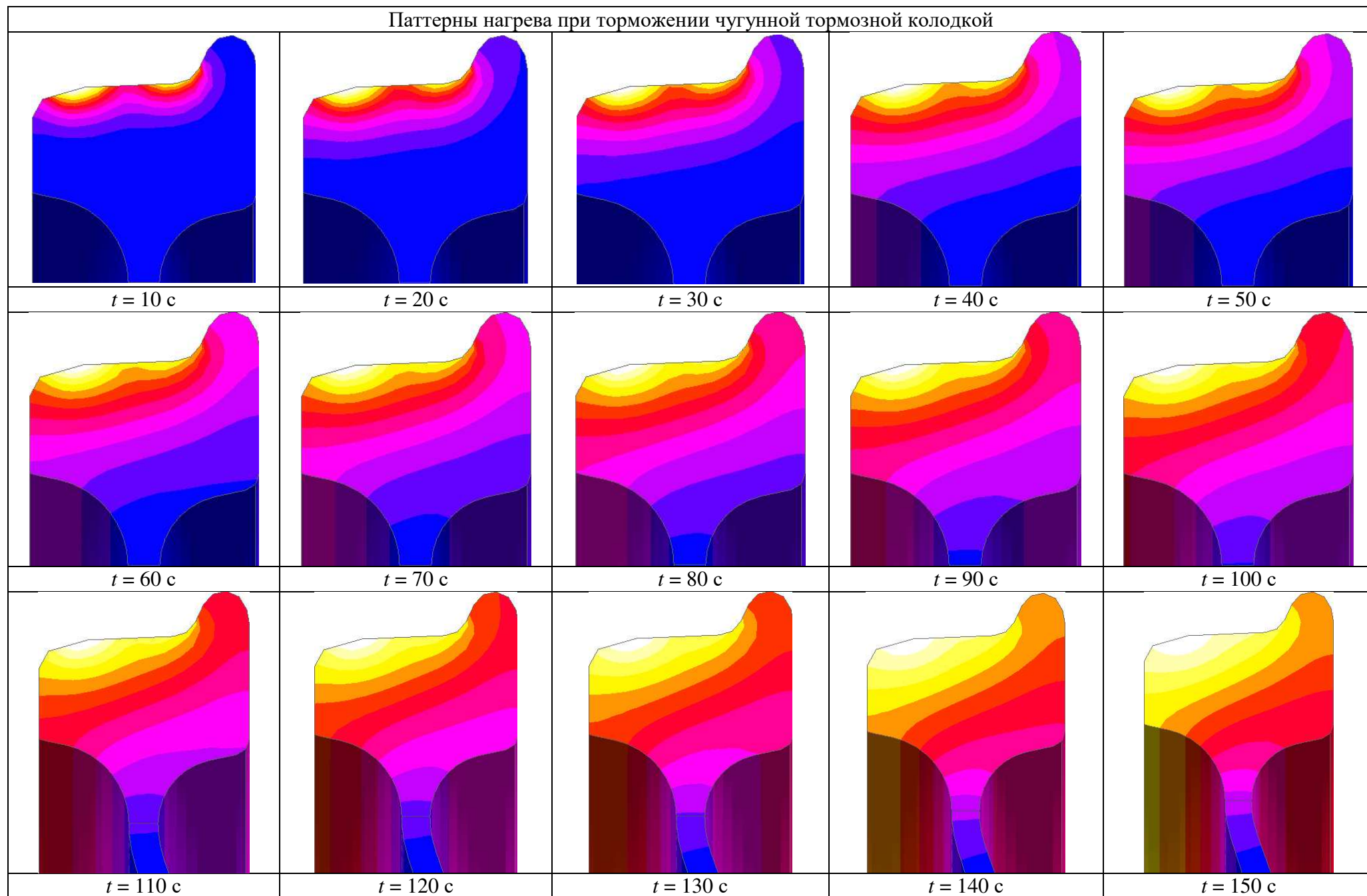
89. Шаповалов В.В. Тепловой расчет фрикционного контакта при возможности термомеханического повреждения / В.В. Шаповалов, А.А. Александров, Р.Г. Ялышев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 4. – С. 103-110.
90. Agostini A. Device For Detecting a Hot Wheel Conition / A. Agostini. – 2013.
91. Bartonek M. Apparatus and Method For Detection of Railroad Wheel and Bearing Temperature / M. Bartonek. – 2005.
92. Bearing and Brake Temperature Alarm Models. – Australia: Transport for NSW, 2017. – 30 с.
93. Berndt D. Method and Apparatus to Contactlessly Measure The Brake Temperatures of Passing Railroad Cars / D. Berndt. – 1989.
94. Church B.P. System and Method For Filtering temperature profiles of a wheel / B.P. Church, D. Arndt.
95. Day A.J. An Analysis of Speed, Temperature, and Performance Characteristics of Automotive Drum Brakes / A.J. Day // Journal of Tribology. – 1988. – № 110. – С. 295-305.
96. Day A.J. The Dissipation of Frictional Energy from the Interface of an Annular Disc Brake / A.J. Day, T.J. Newcomb // Proc. Instn. Mrch. Engrs. – 1984. – № 198D. – С. 201-209.
97. Eisenbrand E. Hot Box Detection in European railway networks / E. Eisenbrand // RTR. – 2011. – № Special. – С. 2-11.
98. EN 15437-1 : 2009 Railway Applications - Axlebox condition monitoring - Interface and design requirements - Part 1: Track side equipment and rolling stock axlebox. – European Committee for Standartization, 2009. – 25 с.
99. Fermer M. Finite element models: [Pap] 10th Int. Wheelset Congr. «Sharing Latest Wheelset Technol. Order Reduce Costs and improve Railway Prod.» / M. Fermer // Nat. Conf. Publ. / Inst. Eng. Austral. – 1992. – № 92/10. – С. 280-281.
100. Gallagher C.A. Infrared Hot Bearing and Hot Wheel Detector / C.A. Gallagher. – 1995.

101. Gallagher C.A. Railway Safety System For Detecting Overheated Brakes / C.A. Gallagher. – 1973.
102. Hot Axlebox Hot Wheel Detector System. – Manaknagar: Research Designs and Standard Organization, 2012. – 18 c.
103. Jamieson M. Automated Train Air Brake Effectiveness Test Process at Canadian Pacific / M. Jamieson, A. Aronian // International Heavy Haul Association. – Calgary, Canada, 2008. – C. 8.
104. Mian Z.F. Thermal Imaging-Based Vehicle Analysis / Z.F. Mian, J.C. Mulaney, Glasser, N. – 2012.
105. Mironov, A. Simulation of wheel heating when drum braking / A. Mironov, P. Shalupina, A. Pavlyukov, I. Dobychin // X International Scientific and Technical Conference “Polytransport Systems”. MATEC Web Conf. Volume 216, 2018. - 6 p. DOI: 10.1051/mateconf/201821603010.
106. Mitura K. Telepné poškodzování železničních kol způsobené intenzivním brzděním / K. Mitura, R. Faja // Železn. techn. – 1980. – № 3. – C. 175-184.
107. Modeling thermal effects in braking systems of railway vehicles / M.S. Milošević [и др.] // Thermal Science. – 2013. – Т. 16. – № SUPPL.2. – C. 515-526.
108. Monitoring Systems For Railway Safety. – Israel: Israel Railways Ltd, 2016. – 42 c.
109. On the thermal effect of tread braking upon car wheels / H. Toshio [и др.] // Quart. Repts Railway Techn. Res. Inst. – 1970. – № 3. – C. 160-162.
110. Shalupina, P. I. Transient Temperatures Patterns of Wheel During Braking / P. I. Shalupina, A. E. Pavlyukov, D. N. Saltykov // Materials of International Conference Scientific Research of the SCO countries: Synergy and Integration. Reports in English. Part 2. Beijing, PRC. – pp. 189-197.
111. Sibley H.C. Hot Wheel Detector Apparatus For Railway Vehicles / H.C. Sibley. – 1966.
112. Sitarz M. Railway wheelsets : Monografia / M. Sitarz. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Slaskiej, 2003. – 101 c.

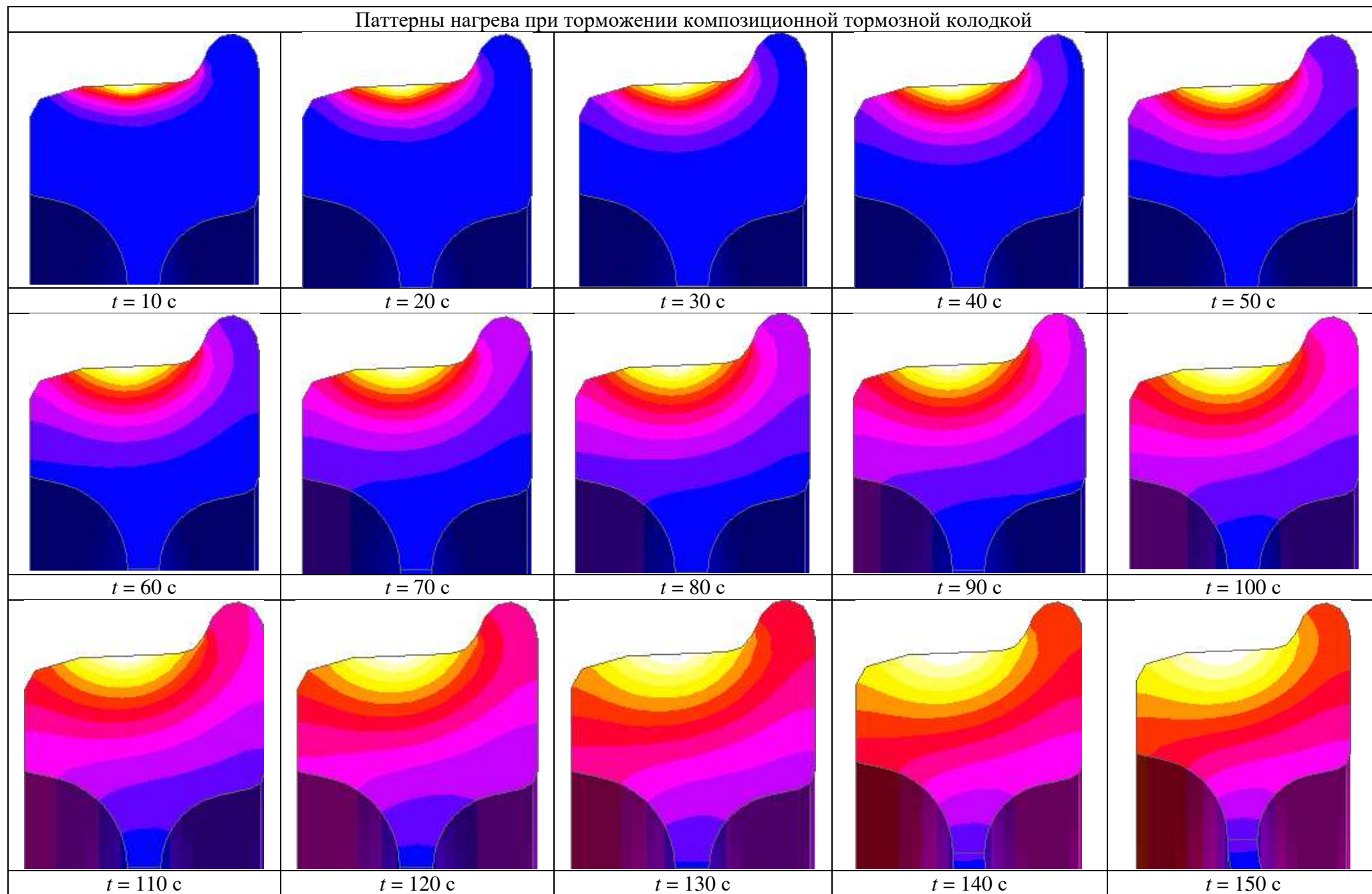
113. Sitarz M. Metody numeryczne w projektowaniu kol kolejowych zestawow kolowych : Monografia / M. Sitarz, A. Sladkowski, K. Chruzik. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Slaskiej NR 60, 2003. – 128 c.
114. Stellfeld J. Temperaturmessungen an hlotzgebremsten Vollrädern im Fahr-betrieb / J. Stellfeld // DET-Eisenbahntechn. – 1981. – № 7. – С. 281-283.
115. Thermal-mechanical modelling of the rolling-plus-sliding with frictional heating of a locomotive wheel / V. Gupta [и др.] // Trans ASME J. Eng. Ind. – 1995. – № 3. – С. 418-422.
116. Tione R. Process for assessing the temperature of the braking elements of a vehicle, in particular a railway vehicle / R. Tione.
117. Tournay H. Use of Wayside Detection for Rolling Stock Performance Mon-itoring and Miantenance / H. Tournay // IHHA Specialist Technical Session (STS). – 2007. – С. 91-100.
118. Train Wheel Bearing Temperature Detection / P. Hesser [и др.]. – 2014.
119. U. S. Department of Transportation. An Implementation Guide for Wayside Detector Systems / U. S. Department of Transportation. – Federal Railroad Adminis-tartion, 2019.
120. Utterback J.J. Detection of Overheated Railroad Wheel and Axle Compo-nents / J.J. Utterback, R.S. Mecca. – 1990.
121. Yaktine D.L. Apparatus and Method For Detecting High Temperatures In Railroad Car Wheels and Bearings / D.L. Yaktine, V.F. Jones.
122. Zhang M. Irreversible Indication of Overheated Railway Vehicle Compo-nents / M. Zhang. – 2004.

ПАТТЕРНЫ НАГРЕВА КОЛЕСА
ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ТОРМОЖЕНИЯ

Паттерны нагрева при торможении чугунной тормозной колодки



Паттерны нагрева при торможении композиционной тормозной колодки



МАТЕРИАЛЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «Инфотэкс АТ»,
доктор технических наук

« 02 »

Миронов А.А.

2020 г.



АКТ

Об использовании результатов кандидатской диссертационной работы

Шалупины Павла Игоревича

составлен комиссией в составе:

Кораблев П.А. – председатель комиссии, директор ООО «Инфотэкс АТ»

Салтыков Д.Н. – член комиссии к.т.н., главный специалист отдела АСК ПС ООО
«Инфотэкс АТ»

в том, что результаты диссертационной работы: «СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ ГРУЗОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, *использованы* при разработке и проектировании перспективных средств теплового контроля ходовых частей подвижного состава в виде учета:

1. Результатов компьютерного моделирования нагрева цельнокатаного колеса грузового вагона при различных режимах торможения и определения траектории и уровня сигнала, получаемого приемником ИК-излучения при назначении пороговых значений теплового контроля колодочных тормозов.

2. Проведенных исследований по выбору наиболее информативной зоны на цельнокатаном колесе грузового вагона с целью осуществления теплового контроля колодочных тормозов при выборе ориентации инфракрасной оптики на контролируемые объекты.

3. Предложенных соискателем алгоритмов теплового контроля для неисправных колодочных тормозов.

Председатель комиссии

Кораблев П.А.

Члены комиссии

Салтыков Д. Н.



УТВЕРЖДАЮ

Исполнительный директор АО
«Людиновский тепловозостроительный
завод»

« _____ » _____ Зеленин А. В.
2020 г.

АКТ



Об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
Шалупины Павла Игоревича в АО «Людиновский тепловозостроительный
завод»

Мы, нижеподписавшиеся, комиссия в составе председателя комиссии – Технического директора АО «Людиновский тепловозостроительный завод», Михеева Ю.Н., членов комиссии: Главного технолога Меньшикова М.М., Начальника технического отдела Павлыша Н.Г., составили настоящий акт в том, что материалы диссертационной работы Шалупины П. И. на тему: «Совершенствование диагностического обеспечения бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов грузового подвижного состава на основе имитационного моделирования», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация, использованы в работе технического отдела АО «Людиновский тепловозостроительный завод». Полученные соискателем результаты моделирования нагрева колеса при различных режимах торможения учитываются в работе технического отдела при проектировании и разработке перспективных конструкций подвижного состава.

Технический директор АО «ЛТЗ»

Михеев Ю.Н.

Главный технолог

Меньшиков М.М.

Начальник ТО

Павлыш Н.Г.