

На правах рукописи



Шалупина Павел Игоревич

**Совершенствование диагностического обеспечения бесконтактного  
теплового контроля колодочных тормозов грузового подвижного состава  
на основе имитационного моделирования**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС).

**Научный руководитель** – доктор технических наук, доцент  
Павлюков Александр Эдуардович

**Официальные оппоненты:**

**Николаев Виктор Александрович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»;

**Меланин Виктор Михайлович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное автономное общеобразовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ), доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство».

**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное общеобразовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС).

Защита состоится «14» мая 2021 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. Б2-15 – зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент



Тимухина Елена Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Стратегией развития железнодорожного транспорта до 2030 года 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 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, недеиствующие 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, С.М. Захаров, С.Н. Киселев, А.Н. Неклюдов, А.В. Саврухин, Р.А. Ефимов, В.К. Першин, А.М. Орлова, 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, С.П. Васильев, О.Е. Ключко, Г.А. Неклюдова, М.И. Глушко и многие другие. Среди

зарубежных исследователей нагрева элементов тормозных систем можно выделить М. Милошевича, К. Митуру, Р. Файа, В. Гупту, М. Ситарца, Х. Тошио 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, А.Г. Алексеев, В.А. Берзин, Э.Г. Миронов, В.Л. Образцов, 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, К. Галлахера, Г. Сибли и других.

Исследованию вопросов теплового контроля колодочных тормозов в настоящее время не уделяется должное внимание, несмотря на рост отцепок вагонов вследствие термомеханических повреждений поверхностей катания колесных пар, доля которых по состоянию на сегодняшний день составляет порядка 19% от общего числа выявляемых неисправностей. Учитывая значительный опыт отечественной теории и практики бесконтактного теплового контроля буксовых узлов, очевидна необходимость совершенствования диагностического обеспечения теплового контроля колодочных тормозов по нагреву колёс.

**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. Предложены 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, позволяющая исследовать тепловые процессы при колодочном торможении.

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 диагностической модели;
- нагрева колёс в эксплуатационных условиях и натурных испытаний экспериментальной системы бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава;
- оценки информативности различных зон на колесе при осуществлении бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов.

3. Оценка корректности разработанной комплексной диагностической модели бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов на основе мониторинга нагрева колёс в реальных условиях эксплуатации.

4. 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 конференции «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 бюджетного 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрена актуальность темы исследования, степень её разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, выносимые на защиту положения, а также степень достоверности и апробация результатов.

**В первой главе** диссертационной работы выполнен краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований нагрева колёс при колодочном торможении; проведен анализ отечественных и зарубежных технических решений систем бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов и направлений их совершенствования; приведены общие сведения о методах исследования тепловых процессов при взаимодействии колеса и тормозной колодки; поставлены задачи исследования.

Анализ исследований тепловых процессов при колодочном торможении показал, что данные о степени и характере нагрева колеса при колодочном торможении противоречивы, поскольку при сходных режимах торможения как отечественные, так и зарубежные исследователи получали различные результаты. При этом основная часть теоретических исследований базируется на плоских осесимметричных моделях с использованием метода конечных элементов. Это приводит к тому, что описание работы тормозного узла не является достаточным с качественной точки зрения, поскольку при исследовании процесса бесконтактного теплового контроля необходим учет распределения температур не только по сечению колеса, но и на внешних его поверхностях. Трудно переоценить значимость накопленной экспериментальной и теоретической базы по исследованиям тепловых процессов при колодочном тормо-

жении, однако в настоящее время в свете заинтересованности ключевых игроков железнодорожной отрасли в применении экономически выгодных систем теплового контроля требуется создание комплексных диагностических 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 бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава.

Анализ технических решений и тенденций в направлении совершенствования устройств 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 имитационного моделирования и проведении экспериментальных исследований с целью подтверждения корректности результатов, получаемых при моделировании.

**Вторая глава** посвящена разработке комплексной диагностической модели бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов на основе применения методов имитационного компьютерного моделирования и рассмотрению общих вопросов, касающихся конструкции и свойств материалов цельнокатаного колеса грузового вагона, а также чугунных и композиционных тормозных колодок, особенностям их взаимодействия при осуществлении колодочного торможения.

Разработанная комплексная имитационная модель бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов имеет блочное описание, где выходные данные одного блока являются входными для последующих (рисунок 1). Так, разработанная модель укрупнённо включает в себя три подмодели (блока): торможение, нагрев колеса и определение траектории сканирования и вычисления уровня сигнала, получаемого приемником инфракрасного излучения. Для автоматизации тормозного расчета и последующей передачи исходных данных в среде табличного процессора *Microsoft Excel* реализована подмодель 1.1. Общая методика тормозного расчета соответствует Правилам тяговых расчетов. Для оценки теплового потока, возникающего между колесом и колодкой в процессе торможения, разработана подмодель 1.2, реализующая расчет теплового потока на основе предварительного тормозного расчета.



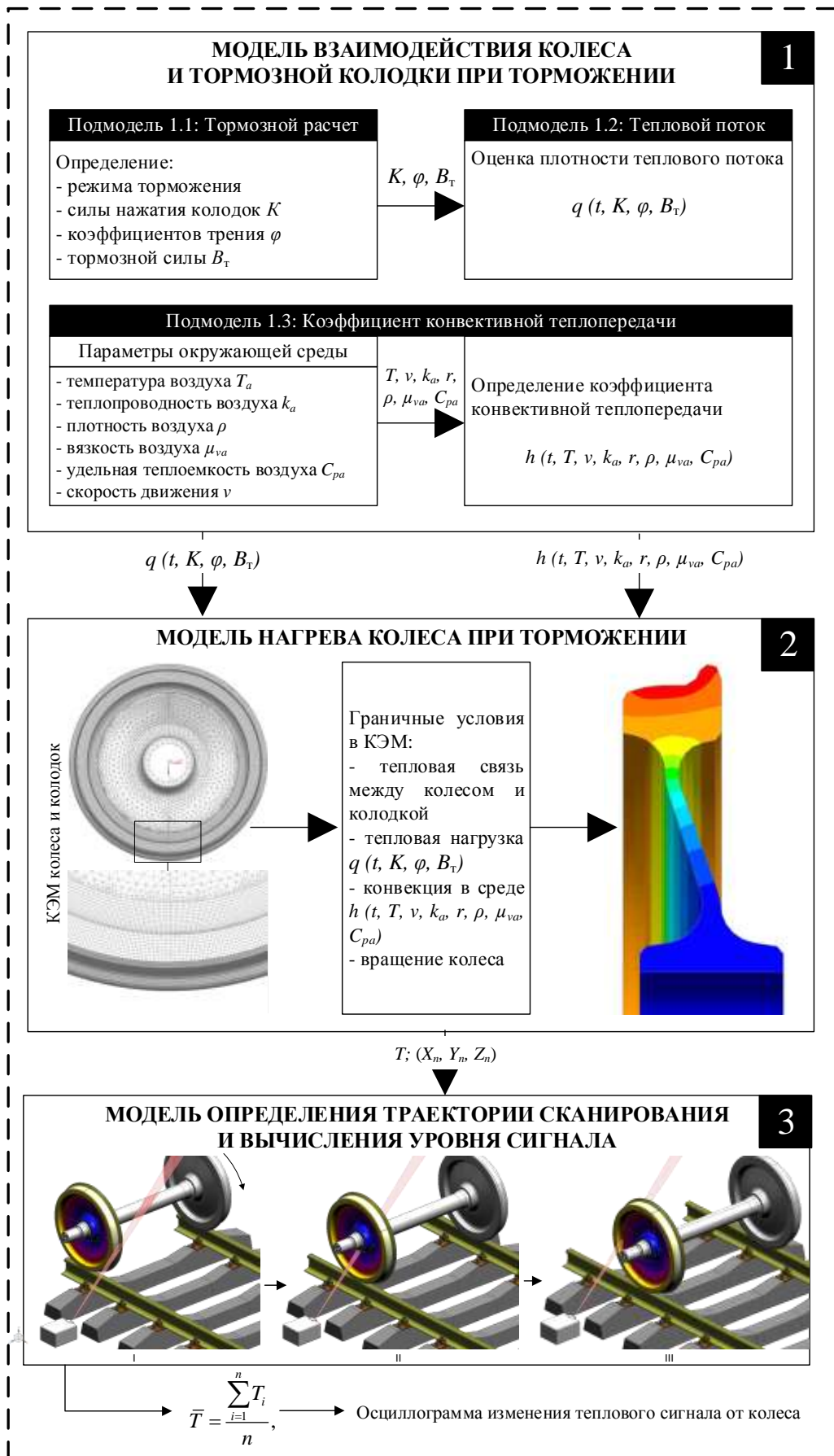


Рисунок 1 – Структура комплексной диагностической модели бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов

Плотность теплового потока согласно принятой методике определяется по следующей зависимости:

$$q(t) = \frac{b(t)\vartheta(t)q_0}{A}, \quad (1)$$

где  $b(t)$  – удельная тормозная сила;  $\vartheta(t)$  – скорость движения вагона;  $q_0$  – осевая нагрузка вагона;  $A$  – площадь трения тормозной колодки.

Для учета явления обтекания колеса воздушным потоком в состав модели включается подмодель 1.3 для определения граничных условий для расчета в рамках метода конечных элементов – коэффициента конвективной теплопередачи. Он определяется как функция, зависящая от скорости движения вагона и физических свойств воздуха при заданной температуре в каждый момент времени  $t$ :

$$h(t) = \frac{0,037\lambda_B}{2r} \left( \frac{2\gamma_B r \times \vartheta(t)}{\mu_{vB}} \right)^{0,8} \left( \frac{c_{pB}\mu_{vB}}{\lambda_B} \right)^{0,33}, \quad (2)$$

где  $\lambda_B$ ,  $\gamma_B$ ,  $\mu_{vB}$  и  $c_{pB}$  – 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. В модели учитывается коэффициент распределения тепловых потоков, который количественно характеризует долю возникающего при трении тепла, поступающего в каждое из трущихся тел. Для колеса и тормозных колодок величины этих коэффициентов ( $\alpha_R$  и  $\alpha_K$ ) связаны зависимостью:

$$\alpha_R = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_K \gamma_K c_K}{\lambda_R \gamma_R c_R} \frac{F_K}{F_R} \frac{\Delta\tau_{пK}}{\Delta\tau_{пR}}}}, \quad (3)$$

где  $\lambda$ ,  $\gamma$ ,  $c$  – соответственно коэффициент теплопроводности, плотность, вязкость и удельная теплоемкость материала;  $F$  – площадь поверхности, на которой выделяется тепло;  $\Delta\tau_{п}$  – избыточная температура тела.

Во втором блоке модели на основе метода конечных элементов реализуется модель нагрева колеса при различных режимах торможения. Методом твердотельного моделирования разработаны объемные геометрические модели колеса, а также чугунной и композиционной тормозных колодок. Для аппроксимации геометрии колеса и тормозных колодок использованы два типа конечных элементов – 8-узловой конечный элемент в виде гексаэдра и 4-узловой – в виде тетраэдра. Результаты численного моделирования представляются в виде динамических картин нестационарного нагрева колеса при взаимодействии с тормозной колодкой. В качестве примера на рисунке 2 приведены результаты моделирования нагрева в длительном режиме торможения.

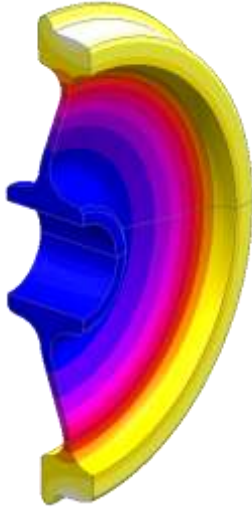


Рисунок 2 – Картина распределения температур в момент времени  $t = 1200$  с

Модель определения траектории сканирования и вычисления уровня сигнала, получаемого приемником инфракрасного излучения, основана на положениях аналогичной модели, впервые предложенной в совместных работах А.Э. Павлюкова и А.А. Миронова при исследовании теплового контроля буксовых узлов. Исходными данными к моделированию являются результаты моделирования нагрева колеса в рассмотренной выше модели. Для отыскания формы траектории, а также формы и площади пятна в каждый момент времени сканирования необходимо решать задачу динамического

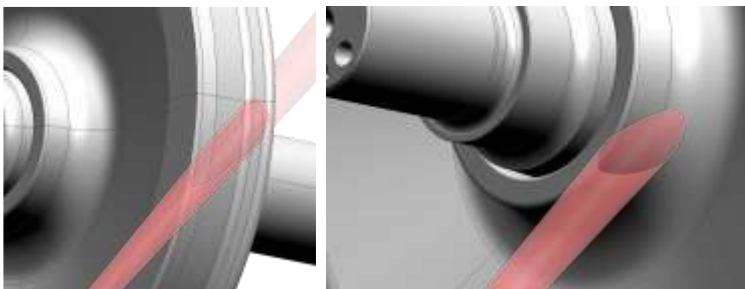
пространственного пересечения поверхности колеса с зоной контроля, имеющей вид конуса с вершиной в точке, из которой исходит оптическая ось приемника. С этой целью разработана математическая модель движения колёсной пары по железнодорожному пути, базирующаяся на применении методов исследования динамики систем твердых тел, в основе которых лежит применение следствий из второго закона Ньютона. Для оценки формы и уровня сигнала, получаемого приемником при сканировании колеса, на каждом шаге моделирования рассчитывается средняя температура пятна по формуле:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (4)$$

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

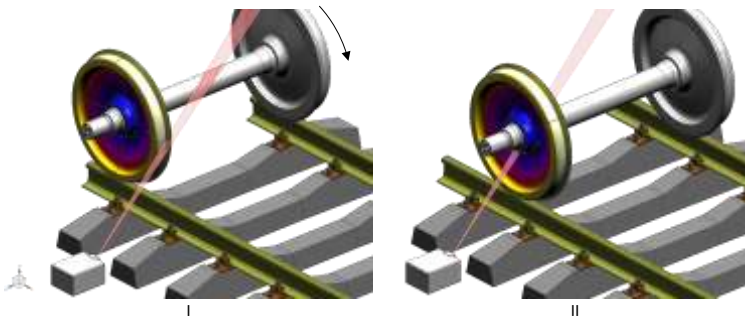
$n$  – количество узлов, попавших в зону контроля.

Значение осциллограммы сигнала, пропорционального температуре участка колеса в зоне контроля, определяется из рассчитанных средних температур в каждый момент времени. Работу предложенной диагностической модели бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов проиллюстрируем рисунком 3.



а) формы пятен при сканировании колеса

**В третьей главе** изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса теплового контроля колодочных тормозов с использованием разработанной диагностической модели.



б) процесс сканирования нагретого колеса

Рисунок 3 – Пример работы имитационной модели бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов

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. В рамках принятых расчетных режимов проведена оценка влияния скорости начала торможения вагона, уклона пути,

температуры окружающей среды, износа колеса, режима воздухораспределителя, материала-наполнителя колодки и продолжительности торможения на процесс нагрева. Дополнительно рассмотрен режим нагрева колеса при заклинивании. Результаты представлены в виде графиков изменения температур в различных точках на колесе, для которых возможна реализация бесконтактного теплового контроля, и картин распределения температур в колесе (при реализации длительных режимов торможения). Установлено, 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  $260^{\circ}\text{C}$  (композиционная колодка) на поверхности катания колеса, в длительных режимах до 20 минут – более  $650^{\circ}\text{C}$  с прогревом металла по всему сечению колеса.

Моделирование нагрева заклиненного колеса показало, что при этом процессе происходит интенсивный нагрев колеса до высоких температур ( $670^{\circ}\text{C}$ ) за относительно небольшой промежуток времени с последующим быстрым охлаждением. Компьютерное моделирование бесконтактного теплового контроля на основе разработанной модели при четырех различных вариантах ориентации ИК-оптики на объект контроля показало существенные различия в получаемых сигналах при изменении её ориентации. Для всех рассмотренных случаев характерно сохранение параболической формы сигнала с изменением амплитудных участков, характеризующих сканирование различных составных частей колеса.

Обобщенный анализ результатов моделирования показал, что при ориентации оптики на колёса 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 системы контроля. Ориентация оптики на колесо с его внутренней стороны позволяет исключить возможное ложное срабатывание при экстренном торможении поезда. Обнаружение заклиненного колеса средствами бесконтактного теплового контроля при использовании приемников и их ориентации, согласно рассмотренным в работе, 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.

Натурные испытания экспериментальной системы теплового контроля колодочных тормозов проводились ООО «Инфотэкс АТ» при непосредственном участии автора в мае-августе 2018 года на участке около ст. 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 (боллометрических и фотонных); оценки достоверности комплексной имитационной 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 системы теплового контроля колодочных тормозов с различными вариантами ориентации: 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; ТИ05 – камера с боллометрическим приемником, размещаемая снаружи пути и ориентированная на ступицу колеса под углом 55°.

С целью оценки достоверности измерений и сравнения показаний, получаемых системами теплового контроля с различной ориентацией ИК-оптики, проведена тепловизионная съемка колёс грузового подвижного состава при прохождении участка железной дороги близ ст. Исток. Проведен контроль двух грузовых поездов, после которого произведена сверка с показаниями системы теплового контроля. В среднем разница максимальных регистрируемых температур оборудованием ТИ05 и Т45 составила 8...12°C. При этом анализ тепловизионных изображений показал, что наиболее точными в плане определения максимальной температуры колеса являются измерения, производимые аппаратурой ТИ05. За период испытаний проведен контроль более 2000 поездов, проходивших через контролируемый участок пути на Свердлов-

ской железной дороге. Проведенный статистический анализ экспериментальных данных позволил выявить, что максимальные регистрируемые температуры колёс подчиняются закону нормального распределения. Проверка этой гипотезы проводилась на основании одновыборочного нормального критерия Колмогорова-Смирнова с учетом модификации Лиллиефорса и уровнем значимости 0,05.

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. Подавляющую часть (96,6%) составляют параболические сигналы. В полученной выборке также обнаружены сигналы (3,4% от общего числа) с явными признаками асимметрии, что свидетельствует о попадании в зону контроля нежелательных элементов.

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 подтверждения корректности разработанных моделей выполнялось наложение сигналов, полученных при помощи диагностической модели и экспериментально (рисунок 4). Разница между максимальными значениями температур, определенными экспериментально и при помощи численного моделирования незначительна и составляет не более 5%. Кроме того, адекватность результатов моделирования подтверждается их сравнением с результатами экспериментальных исследований в других работах и аналитических расчетов по определению температурных полей в колёсах. Разница между результатами численного моделирования и экспериментальных исследований составляет не более 5%, аналитических расчетов – не более 15%.

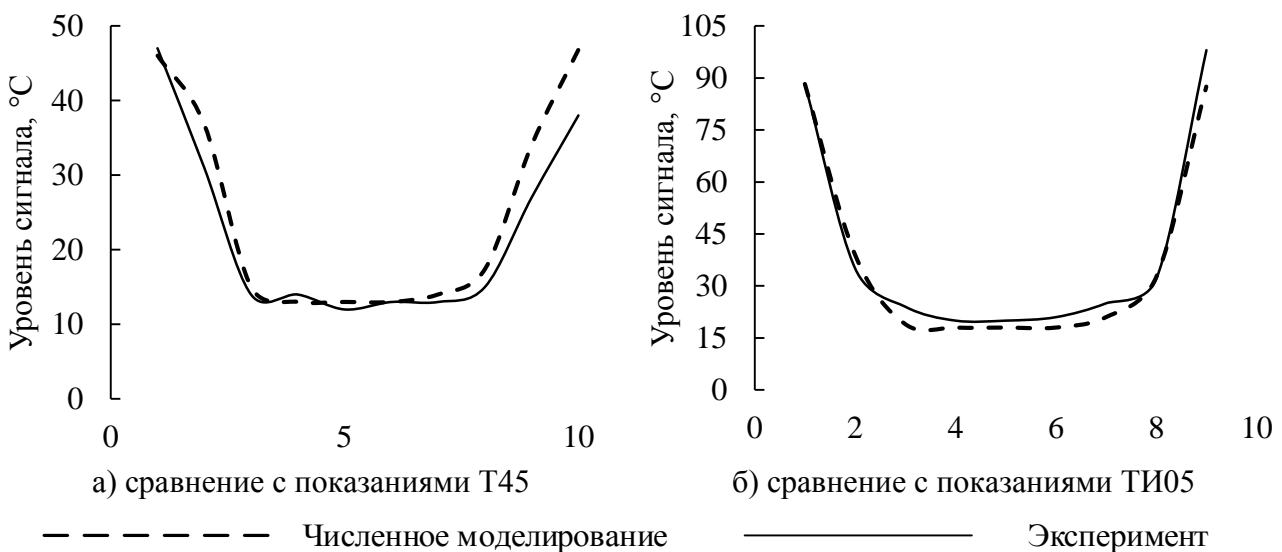


Рисунок 4 – Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных исследований (ось абсцисс на графиках соответствует количеству точек измерения)

**Четвертая глава** посвящена разработке диагностического обеспечения бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов.

На основе анализа конструкции тележки грузового вагона модели 18-578 проведены исследования по выбору наиболее информативной зоны на колесе для осуществления теплового контроля колодочных тормозов. Они 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 (рисунок 5).

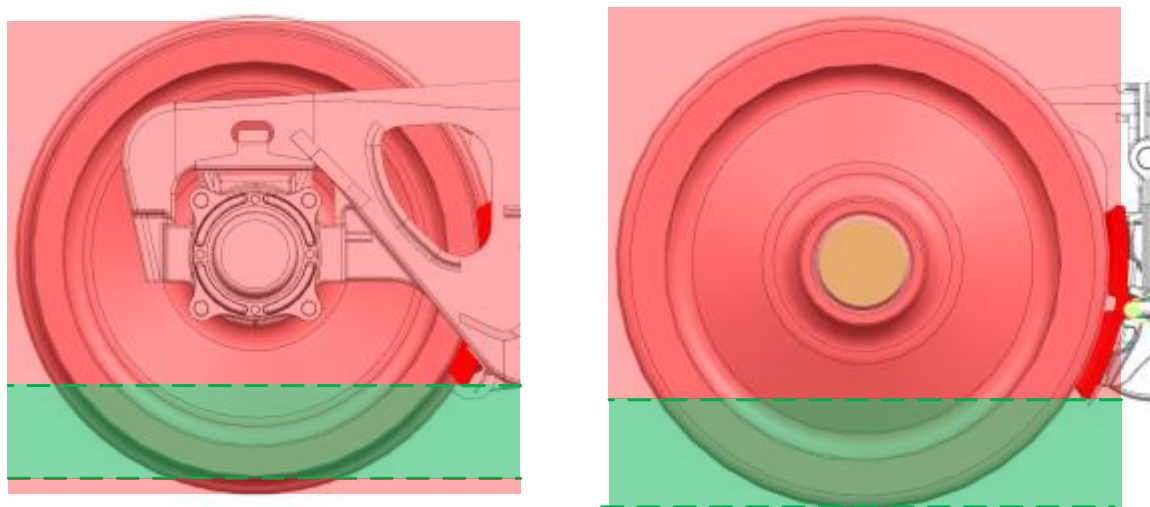


Рисунок 5 – Рекомендуемые к применению зоны колеса для теплового контроля колодочных тормозов (обозначены зеленым цветом)

На основе результатов численного моделирования, опыта реализации систем теплового контроля буксовых узлов отечественными учеными и стандартов проектирования систем теплового контроля зарубежных стран обоснован выбор рациональных диагностических признаков, пороговых значений и разработаны алгоритмы теплового контроля колодочных тормозов. Так установлено, что в общем случае нормальным температурным режимом работы колеса при осуществлении торможения следует считать диапазон температуры колеса от 0 до 260°C, а превышение максимальной температуры колеса значения 340°C – аномальным. Исходя из этих соображений, предложено 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. С точки зрения оценки работоспособности колодочного тормоза предлагается производить коррекцию пороговых значений контроля с учетом темпа замедления поезда (отрицательного ускорения) и уклона контролируемого участка пути, исходя из результатов численного моделирования, показывающих, к примеру, 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. Коррекцию пороговых значений по упомянутым признакам целесообразно объединить с целью упрощения алгоритмов теплового контроля и назначить повышенные пороговые значения.

Колёса, температуры которых превысили порог трех среднеквадратичных отклонений от среднего значения температур колёс по поезду, следует отнести к чрезмерно нагретым. Конкретное пороговое значение контроля необходимо назначать, 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. Для разработки алгоритмов обнаружения «холодных» колёс, предлагается 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. Тревога по «холодному» колесу выделена в отдельный вид тревожной сигнализации («Тревога Д»).

Подбор системы диагностических признаков проведен с учетом теоретических и экспериментальных исследований нагрева колеса при различных режимах торможения, процесса теплового контроля колодочных тормозов, результатов выбора наиболее информативной зоны на колесе и пороговых значений теплового контроля, исследований и разработок отечественных разработчиков систем теплового контроля буксовых узлов (Лозинский С.П., Трестман Е.Е., Самодуров В.И., Образцов В.Л., Миронов А.А.). Исследования по выбору пороговых значений теплового контроля показали, что 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. Исходя из этого, а также ориентируясь на результаты проведенных исследований по выбору пороговых значений контроля, предлагается использовать систему из 5 (пяти) диагностических признаков (таблица). Признак  $P_1$  в целом является достаточно информативным и в некоторой мере самодостаточным признаком, благодаря простоте и очевидности которого имеется возможность эффективного обнаружения чрезмерно нагретых колёс. Признак  $P_2$  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  $\Pi_3$  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.

Таблица – Система диагностических признаков для применения в системах бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов

1 Разность температуры колеса и температуры окружающей среды (относительная температура колеса)	$\Pi_1$	$\Delta T_k = T_k - T_{o.c.}$
2 Разность средней температуры колёс по стороне поезда и температуры окружающей среды (средняя относительная температура колёс по стороне поезда)	$\Pi_2$	$\Delta T_{cp} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \right) - T_{o.c.}$
3 Разность относительной температуры колеса и средней относительной температуры остальных колёс по стороне поезда	$\Pi_3$	$\Delta T_k - \Delta T_{cp}$
4 Отношение относительной температуры колеса к средней относительной температуре колёс по стороне поезда	$\Pi_4$	$\frac{\Delta T_k}{\Delta T_{cp}}$
5 Разность температур колёс одной оси	$\Pi_5$	$Rt = T_{лев} - T_{прав}$

В соответствии с принятой системой диагностических признаков и рекомендованными пороговыми значениями разработаны алгоритмы обнаружения «горячих» и «холодных» колёс для применения в системах теплового контроля колодочных тормозов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Установлено, что при математическом описании процесса теплового контроля необходимо располагать данными о температурном распределении на внешних поверхностях колеса, где возможен контроль средствами бесконтактной тепловой диагностики.

2 Разработана компьютерная реализация комплексной диагностической модели бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов в виде связанных блоков на основе методов имитационного моделирования, в рамках которой возможны исследование нагрева колеса грузового вагона на основе метода конечных элементов, оценка формы и уровня сигнала при различных вариантах ориентации инфракрасной оптики на объект контроля.

3 Компьютерное моделирование нагрева колёс в различных режимах торможения и при его заклинивании показало, что температура колеса при колодочном тор-

мождении 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.

4 Компьютерное моделирование процесса теплового контроля при различных вариантах ориентации инфракрасной оптики показали существенные различия в получаемых сигналах при изменении её ориентации. При сохранении параболической формы сигнала изменяются его амплитудные участки. 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 при экстренном торможении поезда.

5 Проведен мониторинг нагрева колёс в реальных условиях эксплуатации. С использованием тепловизора 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.

6 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%.

7 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.

8 На основе результатов численного моделирования, опыта реализации систем теплового контроля буксовых узлов отечественными учеными и стандартов проектирования систем теплового контроля зарубежных стран разработано диагностическое обеспечение бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов грузового подвижного состава в части выбора рациональных диагностических признаков, пороговых значений, алгоритмов теплового контроля колодочных тормозов.

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.

**Работы опубликованные по теме диссертации:**

**а) публикации в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций»:**

1. Шалупина, П.И. 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.

2. Шалупина, П.И. О необходимости создания инфракрасных напольных систем для контроля работоспособности тормозов на железных дорогах России / Д.Н. Салтыков, П.И. Шалупина // Транспорт Урала. 2018. № 2 (57). С. 47–51. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-2-47-51. ISSN 1815-9400.

3. Шалупина, П.И. 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.

4. 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.

**б) публикации в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных *Scopus*, *Web of Science*:**

5. Shalupina, P. 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.

**в) публикации в журналах и научных сборниках:**

6. Шалупина, П.И. Анализ взаимодействия колеса грузового вагона и чугунной тормозной колодки / А.Э. Павлюков, Шалупина П.И. // Интеграция образовательной, научной и воспитательной 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.

7. Шалупина, П.И. Моделирование нестационарного температурного поля цельнокатанного колеса при колодочном торможении / Д.Н. Салтыков, П.И. Шалу-

пина // Материалы III всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (18 – 19 октября 2018 г.). С. 34-40.

8. 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.

9. Шалупина, П.И. Моделирование работы системы теплового контроля колёс подвижного состава / А. Э. Павлюков, П. И. Шалупина // Сборник трудов конференции «Проблемы и перспективы развития вагоностроения» (г. Брянск, 18-19 апреля 2019 г.). – Курск, 2019. – С. 125-128.

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Статья [4] подготовлена единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1, 6] – анализ повреждаемости тормозных колодок и поверхностей катания колёс грузовых вагонов на основе ранее проведенных соавторами опытных исследований; [3, 5, 7, 9] – разработка комплексной диагностической модели теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава, в основу которой положены разработанная автором имитационная модель нагрева цельнокатаного колеса грузового вагона при различных режимах торможения и её компьютерная реализация на основе метода конечных элементов, а также компьютерная модель определения траектории сканирования и вычисления уровня сигнала, получаемого приемником инфракрасного излучения; [2] – анализ отечественных и зарубежных конструкций напольных инфракрасных систем теплового контроля работоспособности тормозов подвижного состава железных дорог и тенденций их развития.

Шалупина Павел Игоревич

**Совершенствование диагностического обеспечения бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов грузового подвижного состава на основе имитационного моделирования**

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

Подписано в печать 19 февраля 2021 г. Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. л. 1,2. Тираж 100 экз. Заказ 86

УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66