



На правах рукописи

МИРОНОВ Александр Анатольевич



**НАУЧНЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БЕСКОНТАКТНОГО  
ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ БУКС ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО  
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Специальность 05.22.07 - Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

**2 6 Н О Я 2 0 0 9**

Екатеринбург

2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральском государственном университете путей сообщения» на кафедре «Вагоны».

Научный консультант            доктор технических наук, доцент  
**ПАВЛЮКОВ Александр Эдуардович**

Официальные                    доктор технических наук, профессор  
оппоненты:                        **АНИСИМОВ Петр Степанович**

доктор технических наук, профессор  
**СЕРГЕЕВ Борис Сергеевич**

доктор технических наук, профессор  
**ТРЕТЬЯКОВ Александр Владимирович**

Ведущая организация            Научно - исследовательский и проектно-  
конструкторский институт информатизации,  
автоматизации и связи на железнодорожном  
транспорте (ОАО «НИИАС»)

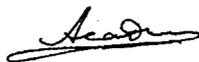
Защита диссертации состоится «25» декабря 2009г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д. 218.013.01 при Уральском государственном университете путей сообщения по адресу: 620034, г. Екатеринбург, Колмогорова 66, ауд. 283. факс (343) 358-55-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного университета путей сообщения.

Автореферат разослан « 5 » ноября 2009 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять в адрес ученого совета университета (факс (343) 358-55-02).

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



**В. Р. АСАДЧЕНКО**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** На железнодорожном транспорте Российской Федерации на буксовый узел приходится до 60 % от общего количества браков по вагонному хозяйству и от 25 до 50 % отцепок вагонов в период гарантийного срока после деповского или капитального ремонта. По данным ОАО «ВНИИЖТ» в первый месяц эксплуатации выходит из строя до 35 % буксовых узлов, в первую очередь, по дефектам смазки и грубым нарушениям технологии монтажа. В последующие месяцы растут отцепки по дефектам смазки, торцевого крепления, повреждениям колец подшипника, роликов и сепаратора. Значительная часть неисправностей буксового узла связана с повышением его нагрева с различной интенсивностью.

Контроль состояния буксовых узлов в эксплуатации производится визуально на пунктах технического обслуживания осмотрщиками вагонов, а на перегонах и подходах к пунктам технического обслуживания (ПТО) – напольными бесконтактными средствами теплового контроля (СТК) по инфракрасному (ИК) излучению от букс проходящих поездов. По существу, СТК являются основным аппаратным средством контроля буксовых узлов на российских железных дорогах и большинстве зарубежных дорог.

Данные системы контроля технического состояния подвижного состава позволяют своевременно выявлять появляющиеся в процессе эксплуатации неисправности ходовых частей подвижного состава и, тем самым, предупредить возникновение необратимых отказов, способных привести к авариям и крушениям.

Широкое применение СТК в деле обеспечения безопасности движения ставит большое количество вопросов в процессе проектирования, эксплуатации и совершенствования СТК и подвижного состава, решение которых требует проведения теоретических и экспериментальных исследований. Однако исследования в данной области несут разрозненный характер, касающийся или объекта диагностирования – буксы, или вопросов совершенствования оборудования СТК. Необходим системный подход к организации и проведению исследований.

**Цель исследования.** Данное исследование посвящено развитию научных и технических основ бесконтактного теплового контроля букс в движущихся поездах.

В соответствии с поставленной в диссертации целью сформулированы следующие задачи:

1. Разработать метод исследования бесконтактного теплового контроля различных типов буксовых узлов с цилиндрическими и коническими роликоподшипниками.
2. Разработать комплекс математических моделей бесконтактного теплового контроля букс и его вычислительную реализацию для имитационного моделирования всего процесса контроля.
3. Разработать на базе созданных математических моделей методику

оценки контролепригодности ходовых частей подвижного состава к тепловой бесконтактной диагностике букс.

4. Провести экспериментальные исследования теплового состояния буксового узла в эксплуатационных и стендовых условиях, выполнить экспериментальную оценку достоверности моделей и целесообразности реализованных технических решений в усовершенствованных средствах теплового контроля.

5. Выполнить теоретические исследования на моделях для решения технических задач, возникающих при эксплуатации и совершенствовании бесконтактного теплового контроля.

6. Предложить расчетно-апостериорную модель статистического характера для распознавания класса неисправных букс и выбора пороговых значений теплового контроля.

7. Разработать и реализовать основные положения создания распределенной системы теплового контроля и мониторинга нагрева буксовых узлов в движущихся поездах с многоуровневой передачей и обработкой информации.

8. Предложить программно-технические решения по созданию систем теплового бесконтактного контроля букс и совершенствования технологии контроля системами, находящимися в эксплуатации.

Решение этих задач позволит повысить эффективность контроля нагрева букс подвижного состава в пути следования, что является важнейшим условием повышения безопасности движения поездов на сети железных дорог РФ.

**Методика исследования.** Общая методика исследований построена на использовании методов теплопередачи и теплообмена, конечного элемента (МКЭ), имитационного моделирования, методах теоретической механики, виртуального трехмерного моделирования, идентификации, аналитической геометрии, статистики и теории вероятности, теплотехнических контактных и бесконтактных измерений, объектно-ориентированного программирования, компьютерных технологий, испытаний в реальных условиях и на стендах, обобщении современных тенденций развития СТК.

**Достоверность исследования** основана на использовании при оценке корректности разработанных моделей теплового контроля результатов проведенных испытаний буксовых узлов на стендах (расхождение результатов расчетов и данных измерений не более 10 %) и на вагонах в реальных условиях эксплуатации, а также результатов периодически проводимых статистических анализов уровней нагрева букс в общесетевой эксплуатации на дорогах ОАО «РЖД».

Обоснованность результатов исследований достигается комплексным использованием проверенных практикой теоретических и эмпирических методов исследования, а модели процесса теплового контроля согласуются с опытом создания и совершенствования средств теплового контроля.

Обоснованность реализованных технических решений средств тепло-

вого контроля оценивалась сопоставлением показаний, полученных СТК бесконтактным способом с контактными измерениями температур буксовых узлов в зоне контроля (среднее расхождение измерений составляет не более 6%), а также положительными результатами подконтрольной эксплуатации на сети дорог ОАО «РЖД».

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Метод исследования бесконтактного теплового контроля различных типов буксовых узлов с цилиндрическими и коническими роликоподшипниками.

2. Комплекс математических моделей бесконтактного теплового контроля, интегрирующий моделирование следующих процессов: действия нагрузок на буксовый узел во время движения вагона; выделения тепла в зонах трения; распространения тепловых потоков от подшипников к шейке оси и к наружным поверхностям, доступным для теплового контроля зон корпусов букс; излучения тепловой энергии с поверхности буксы в ИК области спектра; восприятия ИК излучения приемником напольных средств контроля при воздействии различных дестабилизирующих факторов внешней среды с учетом различных геометрических параметров корпусов букс и характера ориентации сканирующей системы.

3. Методика выбора пороговых значений признаков работоспособного состояния букс.

4. Разработка и применение для различного подвижного состава методики оценки контролепригодности ходовых частей подвижного состава к тепловой бесконтактной диагностике букс.

5. Результаты экспериментальных исследований температурных режимов буксовых узлов с различными типами подшипников, находящихся в работоспособном и предаварийном состояниях, проведенных на стенде, в поездных условиях и в процессе подконтрольной эксплуатации.

6. Теоретические результаты, полученные на моделях:

– особенности распределения тепловых потоков от подшипников к потенциальным зонам контроля на корпусах букс разнородного подвижного состава;

– оценка влияния нагрева ободов, дисков и ступиц колес при колодочном торможении и осей колесных пар при дисковом торможении на нагрев подшипников и корпусов букс в контролируемых зонах;

– характер нагрева буксовых узлов в аварийных режимах работы с наличием различных неисправностей.

7. Программно-технические решения, реализованные при создании средств теплового контроля нового поколения КТСМ-02, совершенствовании контроля базовыми средствами КТСМ-01, разработке и эксплуатации отраслевой распределенной системы контроля и мониторинга нагрева букс.

**Научная новизна работы состоит в следующем:**

1. Предложен новый метод исследования бесконтактного теплового контроля различных типов буксовых узлов с цилиндрическими и коническими

кими роликотопшпниками, основанный на:

- имитационном моделировании всего процесса бесконтактного теплового контроля;
- комплексных экспериментальных исследованиях температурных режимов буксовых узлов в работоспособном состоянии и при наличии основных предаварийных неисправностей;
- распознавании класса неисправных букс при тепловом контроле с учетом опытных данных.

2. Впервые создан комплекс связанных математических моделей бесконтактного теплового контроля различных типов буксовых узлов с цилиндрическими и коническими роликотопшпниками.

Комплекс включает следующие математические модели, разработанные в рамках исследования и имеющие научную новизну:

- термомеханическая модель функционирования буксового узла, которая позволяет моделировать процесс образования тепла в роликотопшпниках цилиндрического и конического типа при рабочих и аварийных режимах, теплопередачу в буксовом узле и теплоотдачу во внешнюю среду в зависимости от нагрузок на буксовый узел и скорости движения вагона;
- математическая модель пространственного сканирования буксы приемником ИК излучения при проследовании поезда, позволяющая получить траекторию сканирования буксы любой заданной геометрии при любых углах ориентации приемника ИК излучения;
- математическая модель ИК излучения с зоны сканирования буксового узла, передачи лучистой энергии на приемник ИК излучения и определение уровня сигнала излучения, соответствующего относительному и абсолютному нагреву буксового узла.

3. Предложена апостериорная модель статистического характера для распознавания класса неисправных букс при тепловом контроле и выбора контрольных значений признаков оценки работоспособного состояния букс.

4. Впервые на базе комплекса моделей бесконтактного теплового контроля разработана методика оценки контролепригодности ходовых частей подвижного состава к тепловой бесконтактной диагностике букс.

**Практическая ценность** проведенных исследований состоит в следующем:

1. Для имитационного моделирования разработана вычислительная реализация комплекса математических моделей бесконтактного теплового контроля различных типов буксовых узлов. Это позволяет проводить численные исследования процессов теплового контроля и разрабатывать рекомендации по созданию новых систем теплового контроля и совершенствования технологии контроля базовыми системами, существенно сократив объем экспериментальных исследований.

2. На базе созданных математических моделей реализована методика оценки контролепригодности ходовых частей подвижного состава к тепловой бесконтактной диагностике букс, которая может быть использована на

стадии проектирования нового подвижного состава для оценки эффективности применяемых средств теплового контроля. Методика апробирована для скоростного пассажирского и тягового подвижного состава и позволила обосновать внедрение на основных магистралях страны конкретные технические решения и алгоритмы теплового контроля.

3. Теоретически и экспериментально получено подтверждение того, что полностью исключить случаи несвоевременного обнаружения аварийного разрушения подшипников при часто встречающихся неисправностях буксового узла (нарушение торцевого крепления подшипников со сдвигом корпуса буксы и ослабление посадки внутреннего кольца подшипника) только средствами теплового контроля нельзя.

4. На основе полученных и научно обоснованных в работе предложений создания и модернизации систем теплового контроля букс разработано техническое обеспечение принципиально новой многофункциональной напольной системы диагностики подвижного состава КТСМ-02 с возможностями подключения к ней подсистем контроля других параметров технического состояния подвижного состава.

5. С учетом структуры и принципов обслуживания подвижного состава в пути следования разработана и программно-аппаратно реализована, на базе оборудования КТСМ, распределенная система теплового контроля и мониторинга нагрева буксовых узлов (АСК ПС) отраслевого назначения.

**Реализация результатов работы.** Результаты выполненных в диссертации исследований использованы при разработке системы теплового контроля КТСМ-02, совершенствовании установок КТСМ-01 для контроля букс разнотипного подвижного состава, для разработки таблиц настройки порогов тревожной сигнализации СТК и применения их на сети ОАО «РЖД». К концу 2008 г. доля КТСМ в общем количестве СТК на дорогах России составляла 100 %, из них доля КТСМ-02 составляла 33 %. Распределенная система теплового контроля и мониторинга нагрева буксовых узлов АСК ПС внедрена на 17 дорогах сети ОАО «РЖД».

**Апробация работы.** Основные положения работы изложены и одобрены на Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (Екатеринбург, УрГУПС, 2003 г.); на 4, 5, 6, 7-ой научно-практических конференциях «Безопасность движения поездов» (Москва, МИИТ, 2003-2006 гг.); на 3-й и 5-й научно-технических конференциях «Подвижной состав XXI века (Идеи. Требования. Проекты)» (Санкт-Петербург, ПГУПС, 2003, 2005 гг.); на LXVI Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы железнодорожного транспорта» (Днепропетровск, ДИИТ, 2006 г.); на НТС ОАО РЖД (29.08.08); на НТС секции ученого совета ФГУП ВНИИЖТ; на научно-технических совещаниях при старшем вице-президенте ОАО «РЖД» В. А. Гапановиче (2004–2009 гг.), посвященных проблемам теплового контроля букс подвижного состава; на НТС филиала ОАО «РЖД» «Свердловская железная дорога» в 2006 г.; на заседании

лаборатории колесных пар и буксового узла ФГУП ВНИИЖТ; на семинарах кафедры «Вагоны» УрГУПС в 2001–2009 гг.

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы изложено в 40 научных работах, опубликованных в журналах «Железнодорожный транспорт», «Вестник ВНИИЖТ», «Транспорт, наука, техника, управление», «Транспорт Урала», «Локомотив», «Автоматика, связь, информатика», «Тяжелое машиностроение», «Вагоны и вагонное хозяйство», научных трудах РАН, МИИТ, УрГУПС, и материалах конференций всероссийского и международного уровней. По теме исследований получено 3 патента РФ на изобретения и одно положительное решение на выдачу патента на изобретение.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов с выводами в каждой из них, заключения, библиографического списка, включающего 182 наименований, изложена на 362 страницах основного текста, включающего 173 рисунка в тексте, два приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности разрабатываемой в диссертации научной проблемы, показывает ее народнохозяйственное значение. Большое внимание уделяется вопросам теплового контроля букс подвижного состава, так как они обеспечивают предотвращение аварийных ситуаций, связанных с неисправностями буксового узла ходовых частей.

**В первом разделе** дан краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований тепловых процессов в буксовых узлах, выполнен анализ конструктивных особенностей буксовых узлов и рам тележек, влияющих на тепловой контроль, а также анализ технических решений систем бесконтактного теплового контроля букс и основных направлений их совершенствования, сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Исследованиям работоспособности в эксплуатации буксовых узлов с подшипниками трения скольжения и трения качения, повышению надежности буксового узла, анализу конструкции посвящены работы российских ученых П.С. Анисимова, В.Н. Белоусова, П.П. Бомбардинова, И.А. Буше, Г.Ф. Гусева, В.И. Донских, О.М. Савчука, С.Г. Иванова, Ю.М. Казанцева, Л.А. Колосова, Н.Н. Кудрявцева, В.В. Лукина, В.В. Новикова, В.Л. Образцова, М.В. Орлова, А.И. Полякова, С.В. Петрова, В.Н. Цюренко, С.Х. Флюменбаума, В.Я. Френкеля, П.С. Юракова.

Разработке принципов комплексного контроля технического состояния подвижного состава и диагностики букс по ИК излучению посвящены труды В.М. Алексенко, А.Г. Алексева, М.В. Анпилова, В.А. Берзина, С.Я. Быкова, Э.Г. Миронова, С.Н. Лозинского, В.Л. Образцова, М.В. Орлова, Е.Н. Розенберга, В.В. Рябцева, В.И. Самодурова, Г.К. Сендерова, М.М. Соколова, Е.Е. Трестмана, А.В. Третьякова, А.Ф. Тагирова, П.С. Шайдурова.

Исследованиям методов обработки информации при выявлении нагретых букс посвящены работы В.Л. Образцова, В.И. Самодурова, Х.Б. Шмермана, Е.Е. Трестмана и других ученых.

Отмеченным проблемам посвящены также работы зарубежных изобретателей и ученых, среди которых: Дж. Амстронг, К. Галахер, Р. Бернес, М. Лаплеш, М.А. Роланд, Г. Сиблей, У. Ротгенштайнер, В.В. Рыбак, С.К. Скляренко, А.А. Строкач и многие другие.

Выполненный анализ имеющихся теоретических и экспериментальных исследований, а также анализ конструктивных особенностей буксовых узлов и рам тележек в контексте теплового контроля показывает, что:

- не выполнялись комплексные исследования теплового контроля букс, которые бы интегрировали анализ функционирования объекта диагностирования и работы средств теплового контроля в модель всего процесса контроля;

- не были исследованы особенности распределения тепловых потоков от подшипников к потенциально контролепригодным зонам корпусов букс разнородного подвижного состава, так как возможности использованных расчетных моделей сводились к оценке средних по объему и поверхности корпуса буксы температур, а большая часть исследований посвящалась оценке правильности выбора параметров подшипников и марок смазок;

- недостаточно исследовались температурные режимы букс и вопросы обеспечения эффективного теплового контроля разнородного (грузовой, тяговый, пассажирский) подвижного состава с различными конструкциями тележек и букс, в том числе с коническими подшипниками кассетного типа;

- не учитывалось влияние аэродинамических свойств рамы тележки, которые у отдельных типов тележек существенно определяют разный нагрев подшипников и корпусов букс на первой и второй осях;

- не было изучено влияние на процессы теплового контроля в совокупности таких факторов, как скорость движения поезда, колебания колесных пар во время движения, диаметр (износ) колес;

- не проводилось исследование взаимного влияния нагрева ободов, дисков и ступиц колес при колодочном торможении и осей колесных пар при дисковом торможении на нагрев подшипников и корпусов букс в контролируемых зонах;

- мало изучены вопросы своевременного обнаружения средствами теплового контроля неисправных буксовых узлов движущихся поездов с наличием различных неисправностей (защемление роликов между бортами наружных колец подшипников, проворот внутренних колец, нарушение торцевого крепления подшипников и др.) до разрушения подшипников.

Кроме того, не были решены следующие технические проблемы:

- создания комплексной многофункциональной напольной системы диагностики подвижного состава, в которой контроль нагрева букс становился бы одной из подсистем, а не базовой подсистемой;

- обоснованного выбора пороговых значений контроля нагрева букс,

в том числе и в зависимости от типа подшипников и расстояний между пунктами контроля на участках безостановочного следования поездов;

- в средствах контроля отсутствовали возможности автоконтроля и автокоррекции параметров приемо-усилительных (измерительных) трактов, самодиагностики всех составных частей и узлов, устройств электропитания и каналов связи;

- отсутствовала система передачи и сбора диагностической информации с целью централизованной обработки и мониторинга теплового состояния буксовых узлов на участках безостановочного движения поездов, хранения баз данных и выдачи по запросам пользователей всей необходимой информации;

- не были решены вопросы стыковки и информационного взаимодействия СТК линейного уровня с автоматизированными системами верхнего уровня (АСУ ПТО, АСОУП, ГИД, КАС АНТ и др.)

Анализ тенденций в направлении совершенствования отечественных и зарубежных систем бесконтактного теплового контроля букс показывает, что процесс в данной области идет по следующим направлениям:

- поиск зон контроля, наилучшим образом отражающих техническое состояние буксовых узлов различных типов;

- увеличение зоны сканирования нижней части корпуса буксы благодаря развертке обзора приемника ИК излучения;

- отказ от камер, установленных рядом с путевой решеткой на отдельном фундаменте в балласте, для теплового контроля пассажирских и грузовых вагонов;

- обеспечение интеграции СТК с напольными системами диагностики подвижного состава, основанными на иных физических принципах;

- совершенствование систем передачи информации о результатах контроля.

Таким образом, выполненный анализ исследований и технических решений позволил сформулировать цель и задачи исследований работы.

**Во втором разделе** рассматривается разработка и компьютерная реализация уникального комплекса математических моделей теплового бесконтактного контроля букс, включающего моделирование работы объекта контроля (буксового узла) и моделирование работы средства теплового контроля при проходе поезда.

Комплекс математических моделей бесконтактного теплового контроля буксовых узлов состоит из следующих блоков – моделей (рисунок 1).

1. Модель движения единицы подвижного состава для оценки перемещений и силового режима работы буксового узла.

2. Термомеханическая модель функционирования буксового узла.

3. Модель сканирования буксы подвижной единицы приемником ИК излучения при проследовании поезда.

4. Моделирование ИК излучения с зоны сканирования и передачи энергии на приемник ИК излучения СТК.

5. Модель работы приемного устройства СТК и определения нагрева буксы.

В первом блоке (см. рисунок 1) решается задача компьютерного моделирования движения вагона по заданным случайным неровностям. Моделирование грузового вагона производится с помощью разработанной на кафедре «Вагоны» УрГУПС модели движения вагона, имеющей 114 степеней свободы. Для моделирования используется программная среда UM, реализующая автоматический синтез уравнений движения систем связанных твердых тел.

Выходными данными моделирования движения являются зависимости вертикальных и осевых сил, действующих на буксовый узел (осциллограммы), по которым определяются математические ожидания (для случайных неровностей) указанных параметров.

Во втором блоке реализуется термомеханическая модель, состоящая в свою очередь из подмоделей (2.1–2.3, см рисунок 1):

- образования тепла в работающем подшипнике (2.1);
- распределения температурных полей в буксовом узле (2.2);
- газодинамическая (2.3).

На уровне подмодели 2.1 решается задача определения теплообразования в работающем подшипнике от нагрузок, полученных на модели блока 1. На рисунках 2 и 3 показаны расчетные зоны теплообразования для букс с коническим и цилиндрическими подшипниками.

#### *Тепловые потоки от сил трения качения*

Определение тепловых потоков базируется на расчете угловых и линейных скоростей деталей подшипника, расчете распределения нагрузок на ролики. Условимся считать зону, ограниченную углом  $\varphi$  и в которой воспринимается телами качения радиальная нагрузка, действующая на подшипник, «нагруженной зоной», соответственно зону, ограниченную углом  $360 - \varphi$ , «ненагруженной зоной».

Тогда радиальная плотность теплового потока по «нагруженной зоне» наружного кольца (см. рисунок 2) каждого цилиндрического подшипника от сил трения качения определяется

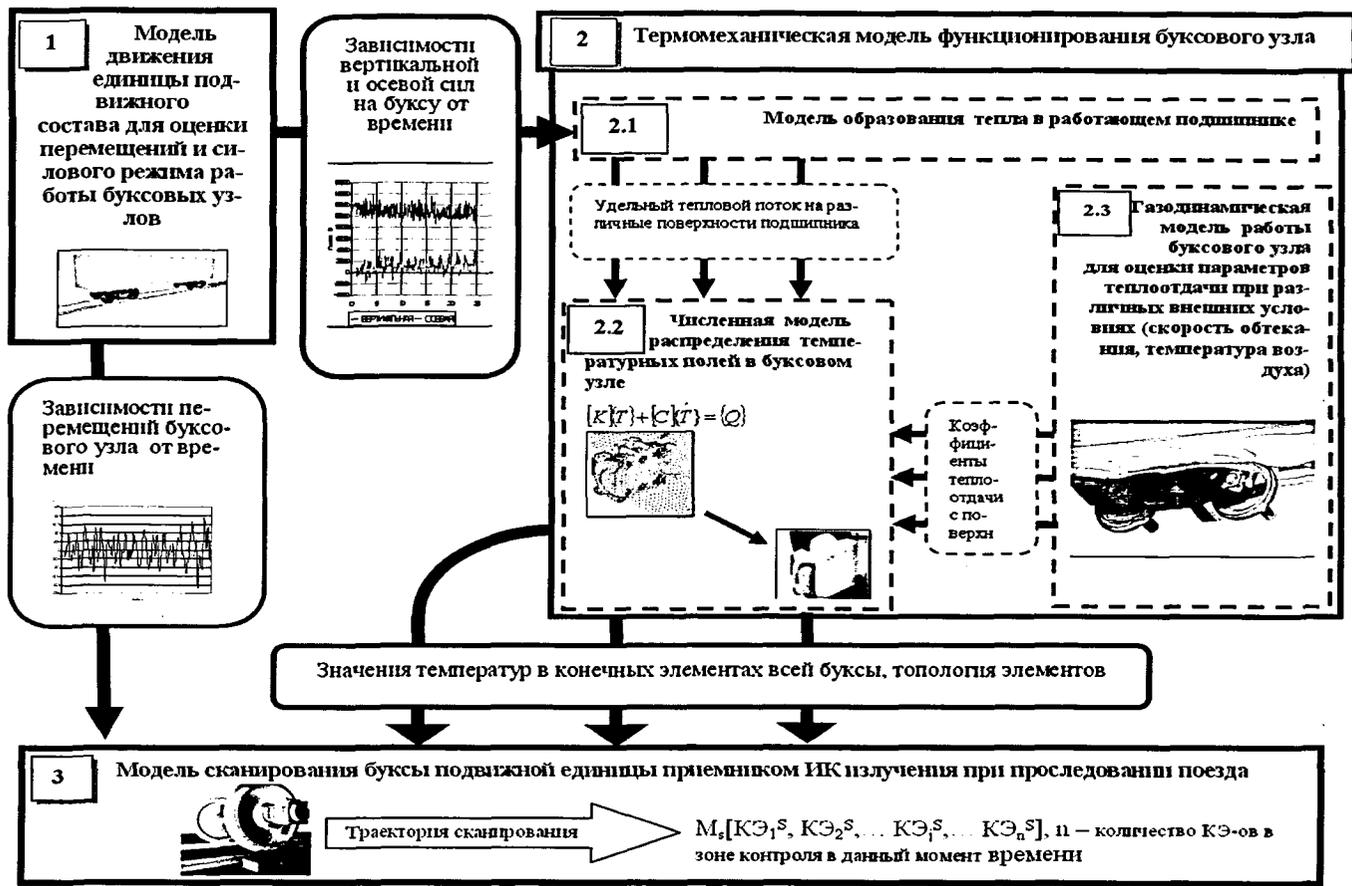
$$q_{нр\_цл}^{\varphi} = ((Q_p + Q_{\varphi})f_k i_n \frac{\varphi}{360} 2\pi R \frac{\varphi}{360}) / 2\pi R \frac{\varphi}{360} l_p = (Q_p + Q_{\varphi})f_k i_n \frac{\varphi}{360} (1).$$

Суммарная плотность теплового потока в радиально нагруженной зоне наружного кольца от первого и второго ряда роликов конического подшипника (см. рисунок 3) вычисляется

$$q_{нр\_кн}^{\varphi_{1,2}} = (Q_{p_1} + Q_{\varphi})f_k i_n \frac{\varphi_1}{360} \frac{1}{p} + (Q_{p_2} + Q_{\varphi})f_k i_n \frac{\varphi_2}{360} \frac{1}{p}. \quad (2)$$

Плотность теплового потока по «ненагруженной зоне» наружного кольца каждого цилиндрического подшипника (см. рисунок 2) определяется

$$q_{нр\_цл}^{360-\varphi} = Q_{\varphi} f_k i_n \frac{360-\varphi}{360} \frac{1}{p}. \quad (3)$$



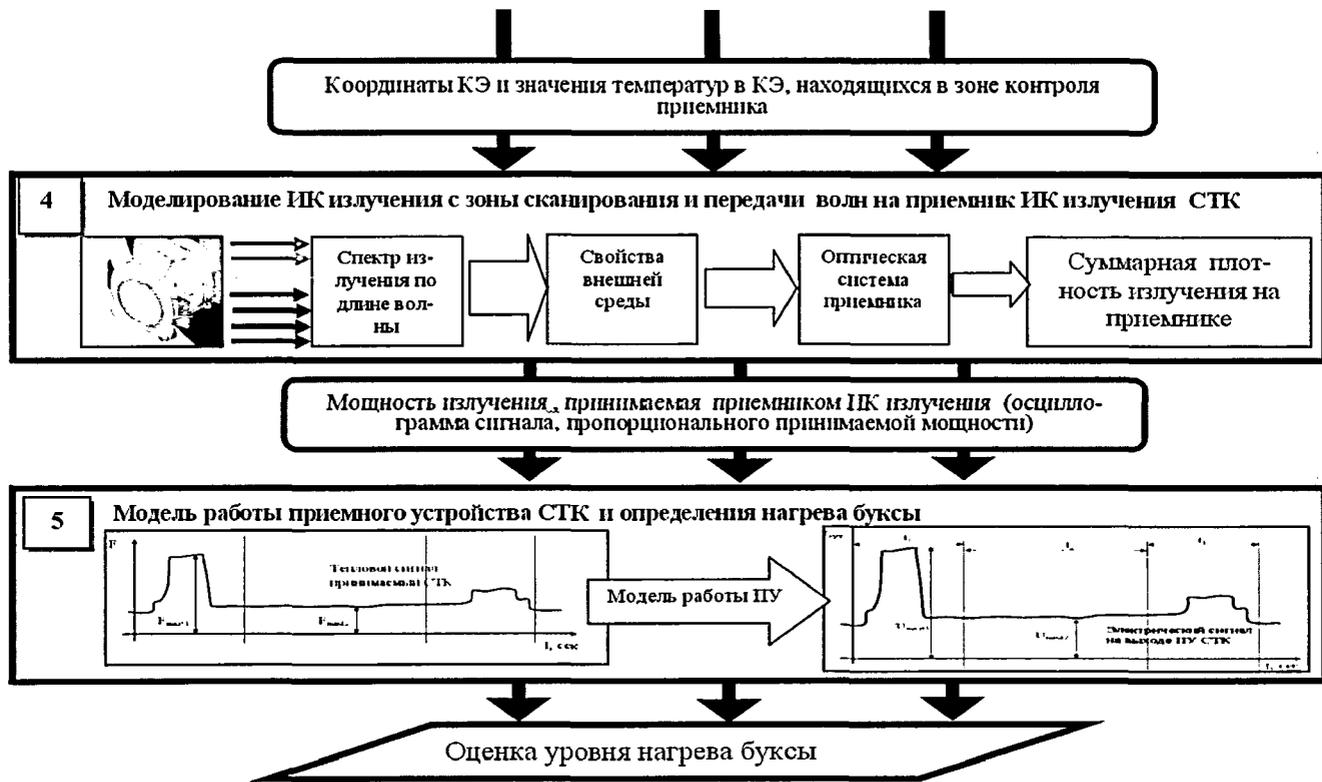


Рисунок 1– Схема комплекса математических моделей функционирования объектов и средств тепловой диагностики буск ( □ – блоки моделей; □ – входные-выходные данные блоков)

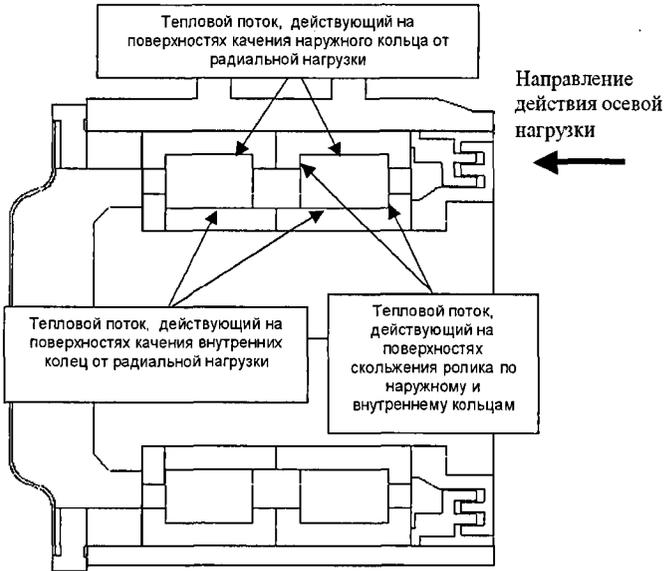


Рисунок 2 – Зоны образования тепловых потоков в буксе с цилиндрическими подшипниками, принятые при моделировании

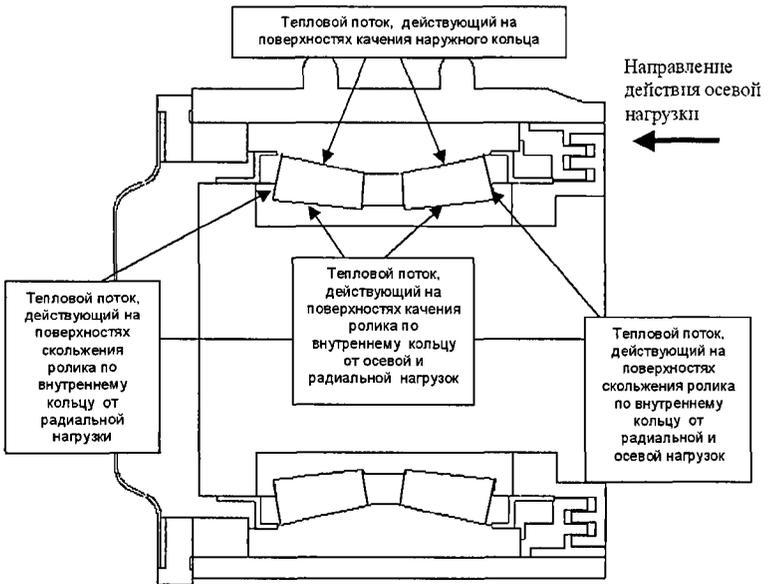


Рисунок 3 – Зоны образования тепловых потоков в буксе с двухрядным коническим подшипником, принятые при моделировании

Суммарная плотность теплового потока по «ненагруженной зоне» наружного кольца конического подшипника (см. рисунок 3) определяется

$$q_{нр\_кн}^{360-\varphi_{1,2}} = Q_{\psi} f_{\kappa} i_n \frac{360-\varphi_1}{360l_p} + Q_{\psi} f_{\kappa} i_n \frac{360-\varphi_2}{360l_p}. \quad (4)$$

В формулах (1) – (4)  $f_{\kappa}$  – коэффициент трения качения для подшипника (используется зависимость изменения коэффициента трения от температуры на подшипнике, зависимость определяется путем идентификации по экспериментальным данным в разделе 3);  $l_p$  – длина ролика;  $i_n$  – число контактов, приходящихся в секунду на наружном кольце подшипника;  $Q_p$  – средняя радиальная нагрузка на ролик;  $Q_{\psi} = m_p d_0 \omega_c^2$  – центробежная сила, действующая на каждый ролик в подшипнике,  $m_p$  – масса ролика,  $d_0$  – диаметр окружности центров роликов,  $\omega_c$  – угловая скорость вращения сепаратора.

При расчете радиальной плотности теплового потока на внутреннем кольце подшипника учитывается, что внутреннее кольцо вращается, поэтому в модели тепловой поток прикладывался на всю радиальную поверхность внутреннего кольца (см. рисунки 2, 3). Тогда радиальная плотность теплового потока на внутреннем кольце находится

$$q_{вр} = [Q_p - Q_{\psi}] f_{\kappa} i_n l_{\psi}^{\varphi} / S_{\psi}, \quad (5)$$

где  $l_{\psi}^{\varphi} = 2\pi R_{\psi} \frac{\varphi}{360}$  – длина дуги нагруженной зоны внутреннего кольца по средней линии;  $S_{\psi} = 2\pi R_{\psi} l_p$  – площадь поверхности внутреннего кольца.

Для внутренних колец конического подшипника в выражении (5) соответственно для первого кольца –  $\varphi_1$ , второго кольца –  $\varphi_2$ .

#### *Тепловые потоки от сил трения скольжения*

Расчет плотности теплового потока на торцевые поверхности колец цилиндрического подшипника (см. рисунок 2).

Плотность теплового потока на наружном кольце

$$q_{на} = \frac{2\pi Q_a f_{ск} n Z R_{сн}}{S_{на}}, \quad (6)$$

где  $Q_a$  – средняя осевая (аксиальная) нагрузка на ролик;  $Z$  – количество роликов;  $n_c$  – частота вращения сепаратора;  $R_{сн}$  – радиус средней линии торцевой поверхности наружного кольца;  $S_{на}$  – площадь торцевой поверхности борта наружного кольца;  $f_{ск}$  – коэффициент трения скольжения для цилиндрического подшипника.

Плотность теплового потока на внутреннем кольце цилиндрического подшипника

$$q_{\text{ва}} = \frac{2\pi Q_a f_{\text{ск}} n_c ZR_{\text{св}}}{S_{\text{ва}}}, \quad (7)$$

где  $R_{\text{св}}$  – радиус средней линии торцевой поверхности борта внутреннего кольца;  $S_{\text{ва}}$  – площадь торцевой поверхности борта внутреннего кольца.

Для конического подшипника (см. рисунок 3) аксиальная плотность теплового потока на внутреннем кольце второго и первого рядов конического подшипника от радиальной нагрузки

$$q_{\text{ва}} = \frac{\pi d_0 Q_p f_{\text{ск}} Z n_c \sin \alpha}{S_{\text{ва}}^{\text{к}}}, \quad (8)$$

где  $S_{\text{ва}}^{\text{к}}$  – площадь торцевой поверхности внутреннего кольца, взаимодействующей с роликами;  $f_{\text{ск}}$  – коэффициент трения скольжения для конического подшипника;  $\alpha$  – угол контакта.

Аксиальная плотность теплового потока от осевой нагрузки на внутреннем кольце ряда роликов, воспринимающим первым осевую нагрузку

$$q_{\text{вал}} = \frac{\pi d_0 Q_a f_{\text{ск}} Z n_c}{S_{\text{ва}}^{\text{к}}}. \quad (9)$$

Тепловые потоки, вычисляемые по формулам (1) – (9), используются в качестве «нагрузок» для оценки распределения температурных полей в буксовом узле с цилиндрическими и коническим подшипниками методом конечных элементов (МКЭ).

Уравнение теплопереноса в частных производных, записанное в векторно-матричном виде, выразится следующим образом:

$$\rho C \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \{V\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = \{\ddot{q}\}, \quad (10)$$

где  $\rho$  – плотность;  $C$  – теплоемкость;  $T$  – температура;  $t$  – время;  $\{V\}$  – вектор скорости передачи тепла;  $\{L\}$  – векторный оператор дифференцирования  $\{q\}$  – вектор теплового потока;  $\{\ddot{q}\}$  – генерация тепла в единице объема.

Уравнение (10) в матричной форме, приведенное к методу конечных элементов, записывается следующим образом:

$$[K]\{T\} + [C]\{\dot{T}\} = \{Q\}, \quad (11)$$

где  $[K]$  – матрица теплопроводности;  $[C]$  – матрица удельных теплоемкостей;  $\{T\}$  – узловые температуры;  $\{\dot{T}\}$  – скорость изменения температуры;  $\{Q\}$  – вектор узлового теплового потока.

Для аппроксимации геометрии буксового узла (рисунок 4) примени-

тельно к тепловому анализу и использованному программному комплексу ANSYS выбран объемный десятиузловой КЭ в виде тетраэдра.

При разработке конечно-элементной модели и расчетной схемы применен оригинальный подход, который позволил смоделировать теплоперенос из «нагруженной зоны», ограниченной углом  $\varphi$ , в «ненагруженную» за счет вращающихся деталей. Очевидно, что основной нагрев роликов, сепаратора, смазки и внутренних колец подшипника происходит в «нагруженной зоне», ограниченной углом  $\varphi$ , а в «ненагруженной зоне» происходит перераспределение тепла между движущимися и неподвижными деталями буксового узла. Поэтому основным элементом примененного подхода, учитывающим описанные выше явления, является использование в модели следующего допущения: объем, занимаемый роликами, сепаратором и смазкой, в подшипнике заменен в цилиндрической системе координат модели единым телом вращения (РСС – ролик-сепаратор-смазка), которое также разбивалось на конечные элементы. При этом через свойства отдельных компонентов определялись эквивалентные теплофизические свойства (плотность, теплоемкость и теплопроводность) тела РСС. Эквивалентная теплопроводность  $\lambda_{РСС}$  комплекса РСС в направлениях осей цилиндрической системы координат модели определялась по формуле

$$\lambda_{РСС} = \frac{\lambda_{рол} V_{рол} Z + \lambda_c V_c + \lambda_{см} V_{см}}{V_{РСС}} \cdot n,$$

где  $n$  – частота вращения соответственно: для оси  $y$  – частота вращения сепаратора подшипника;  $n = 1$  – для оси  $z$ , для оси  $x$  – частота вращения ролика вокруг своей оси;  $V$  – объем; индексы:  $рол$  – ролик;  $c$  – сепаратор;  $см$  – смазка.

Это позволило смоделировать перераспределение тепла при вращении обоймы роликов с сепаратором. Аналогичным образом в модели определялись теплопроводности всех вращающихся тел буксового узла.

Учитывая, что при движении буксовый узел функционирует в условиях обтекания воздушным потоком, который влияет на тепловой режим узла, то разработана модель для расчета обтекания встречным потоком воздуха буксового узла. Задача состоит в определении граничных условий для расчета по МКЭ – коэффициентов теплоотдачи и распределении их по поверхности корпуса буксы и крышки при различных начальных температурах буксы, температурах и скорости набегающего потока.

Буксовый узел представляет тело сложной геометрической формы, которую можно смоделировать как сочетание цилиндрических и плоских

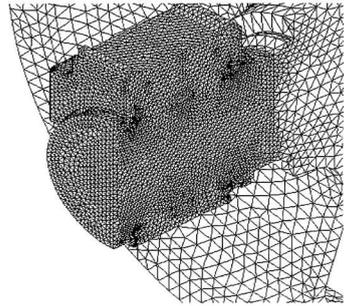


Рисунок 4 – Аппроксимация конечными элементами буксового узла с коническим подшипником и адаптером

поверхностей. Поэтому решение задачи теплоотдачи на поверхности буксового узла производилось для ламинарного режима с помощью критериальных уравнений для цилиндра и пластины.

В третьем блоке (см. рисунок 1) моделируется проследование буксового узла через зону контроля приемника ИК излучения. При этом решается

геометрическая пространственная задача динамического пересечения поверхности буксового узла с зоной контроля приемника, выраженной в пространстве конусом с вершиной, находящейся в точке, из которой исходит оптическая ось приемника (рисунок 5). Поскольку СТК воспринимает тепловое излучение только наружных поверхностей элементов, то в модель сканирования буксы передаются данные (координаты) лишь внешних узлов конечно-элементной сетки. Оставшиеся после селекции конечные элементы приобретают трехузловую структуру, представляющую собой участок поверхности, ограниченной треугольником. Задача решается путем перевода с помощью векторно-матричных преобразований координат узлов КЭ из подвижной системы координат, связанной с буксой, в базовую неподвижную («земля»). Это позволяет при расчете положения узлов КЭ учесть перемещения и углы поворота буксы в пространстве при движении вагона. В результате на базе исходного массива конечных элементов (КЭ) с поверхности контролируемого буксового узла единицы подвижного состава  $M_T[KЭ_1^s, KЭ_2^s, \dots, KЭ_i^s, \dots, KЭ_k^s]$  ( $k$  – номер конечного элемента;  $s$  – индекс КЭ, у которых три узла находятся на поверхности буксового узла) в процессе «отсева» КЭ по признаку «попадания» в зону контроля приемника ИК излучения формируется новый массив  $n$  конечных элементов, находящихся в данный момент времени в зоне контроля и тепловое излучение которых воспринимается приемником.

Таким образом, в четвертый блок передается геометрическая и физическая информация о конечных элементах, находящихся в зоне контроля приемника в каждый момент времени. По рассчитанным значениям средних температур в КЭ, находящихся в зоне контроля («пятне») в каждый момент времени, может быть построена осциллограмма теплового сигнала, пропорционального считанной температуре.

В четвертом блоке комплекса моделей выполняется определение параметров инфракрасного излучения с полученного в блоке 3 массива ко-

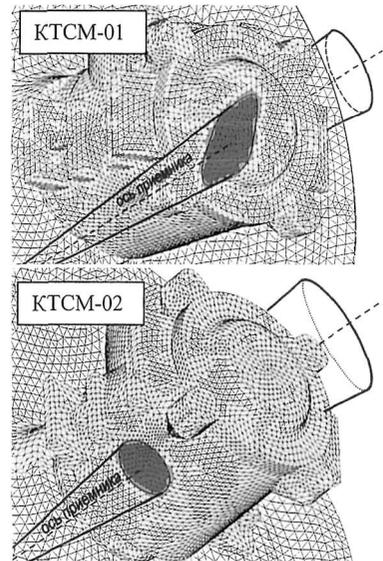


Рисунок 5 – Пересечение поверхности КЭ модели буксы с зоной контроля ИК приемника

нечных элементов  $n$ , попавших в зону контроля приемника в каждый момент времени. При этом моделируются факторы, влияющие на прием излучения, это – свойства внешней среды, геометрические параметры системы.

Лучистый поток, воспринимаемый приемником, со спектральной чувствительностью, заключенной в диапазоне длин волн  $\lambda_1, \dots, \lambda_2$  вычисляется согласно законов теплообмена излучением по формуле

$$F = \frac{S_{об} \cdot \varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda}(\lambda) \cdot K_a(\lambda) \cdot K_0(\lambda) \cdot r(\lambda, T) d\lambda \int_{(S)} \frac{\cos(\alpha) \cdot \cos(\omega)}{l^2}, \quad (12)$$

где  $S_{об}$  – рабочая площадь объектива приемника ИК излучения;  
 $S_{\lambda}(\lambda)$  – спектральная чувствительность приемника ИК излучения;  
 $K_a(\lambda)$  – коэффициент пропускания атмосферы;  
 $K_0(\lambda)$  – коэффициент пропускания оптической системы;  
 $r(\lambda, T)$  – спектральная интенсивность плотности излучения абсолютно черного тела;  
 $l$  – расстояние от центра объектива до площадки излучения;  
 $\varepsilon$  – степень черноты или коэффициент излучения;  
 $\omega, \alpha$  – углы между направлением оптической оси и нормалью поверхности.

Конечные элементы в зоне контроля имеют различную температуру и соответственно положение в спектре максимальной спектральной плотности излучения, которое определяется законом смещения Вина. Кроме того, КЭ имеют различную ориентацию относительно приемника. Учитывая это, а также считая площадь КЭ очень малой величиной, запишем выражение (12) для массива  $n$  КЭ, попадающих в зону контроля, в виде

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{q=1}^u F_i^q = \frac{S_{об} \cdot \varepsilon}{\pi} \sum_{i=1}^n \sum_{q=1}^u \left( S_{\lambda}^q \cdot K_a^q \cdot K_0^q \cdot R_i^q \cdot S_i \cdot \frac{\cos(\varphi_i)}{l_i^2} \right), \quad (13)$$

где  $i$  – номер КЭ;  
 $q$  – номер интервала спектра излучения;  
 $S_{\lambda}^q, K_a^q, K_0^q$  – спектральная чувствительность и коэффициенты пропускания атмосферы и приемника, определенные как константы для  $q$ -го интервала спектра излучения;  
 $u$  – количество интервалов, на которые разбита инфракрасная область спектра электромагнитного излучения;  
 $S_i$  – площадь  $i$ -го конечного элемента;  
 $R_i^q$  – суммарная плотность излучения  $i$ -го КЭ как абсолютно черного тела, в интервале диапазона волн  $q$ ;  
 $\varphi_i$  – угол между направляющим вектором ориентации приемника и нормали  $i$ -го конечного элемента;  
 $l_i$  – расстояние между приемником и  $i$ -м конечным элементом.

Суммарная плотность излучения  $R_i^q$   $i$ -го КЭ определяется из выражения закона Планка для распределения интенсивности излучения по спектру для абсолютно черного тела

$$R_i^q = \int_{\lambda_1^q}^{\lambda_2^q} \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot K \cdot T_i}} - 1 \right)} d\lambda, \quad (14)$$

где  $h = 6.6256 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  $c = 2.998 \cdot 10^8$  м/с – скорость света;  $k = 1.38054 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура черного тела в градусах К,  $\lambda_1^q, \lambda_2^q$  – границы  $q$ -го диапазона излучения.

В 5 блоке моделируется работа приемного устройства СТК. В зависимости от эксплуатационных условий и возможностей аппаратуры применяются абсолютная (температурная) или относительная (по относительной температуре или в условных квантах теплового сигнала) оценки нагрева букс подвижного состава.

Определив значение мощности излучения  $F$ , принимаемого приемником СТК (см. формулу 13), можно рассчитать среднюю абсолютную температуру поверхности нагретого тела (буксы) в зоне контроля («пятне»). При этом для расчета воспользуемся формулой (12), подставляя в нее средние значения параметров ( $l, \omega, \alpha$ ), общую площадь  $S$  зоны контроля («пятна») поверхности буксы и заданное значение прозрачности среды  $K_a$ .

Запишем формулу (12) для СТК с диапазоном спектральной чувствительности приемника ( $\lambda_1 - \lambda_2$ )

$$F = \frac{S \cdot S_{об} \cdot \varepsilon}{\pi} S_{\lambda} \cdot K_a \cdot K_o \cdot R_{cp} \frac{\cos(\alpha) \cdot \cos(\omega)}{l^2}, \quad (15)$$

где  $S$  – площадь зоны контроля поверхности буксы («пятна»);

$R_{cp}$  – средняя плотность излучения поверхности тела в зоне контроля.

Из выражения (15) найдем среднюю плотность излучения  $R_{cp}$

$$R_{cp} = \frac{F \cdot \pi \cdot l^2}{S \cdot S_{об} \cdot \varepsilon \cdot S_{\lambda} \cdot K_a \cdot K_o \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\omega)}. \quad (16)$$

Опишем связь между плотностью излучения и температурой излучателя. Поскольку интеграл в формуле Планка (14) не поддается аналитическому решению, установить зависимость между  $R$  и  $T$  можно путем аппроксимации решений интеграла, полученных численными методами. Тогда средняя температура поверхности буксы в зоне контроля ИК приемником может быть представлена

$$T_{cp} = f(R_{cp}). \quad (17)$$

Уровень теплового сигнала (ТС) в градусах определяется как разность температур  $\Delta T$  буксы  $T_B$  и элементов тележки  $T_T$  (фон), находящихся в сходных физических условиях, но при этом не подверженных тепловому влиянию буксы.

Таким образом, разность  $\Delta T$  будет равна

$$\Delta T = T_B - T_T = f(R_B) - f(R_T).$$

Для пересчета уровня ТС из градусов в кванты, используемые в средствах теплового контроля ПОНАБ, ДИСК и КТСМ, воспользуемся устанавливаемой при калибровке данной аппаратуры ценой одного кванта  $\zeta$  в °С (зависит от температуры наружного воздуха  $T_{HB}$ )

$$\zeta(T_{HB}) = \frac{U_{p.k}}{\Delta T_K} = \frac{U_{p.k}}{(T_H(T_{HB}) - T_{HB})},$$

где  $T_H$  – температура нагревателя калибратора (зависит от температуры наружного воздуха  $T_{HB}$ );  $U_{p.k}$ ,  $\Delta T_K$  – уровень теплового сигнала на который калибруется прибор в квантах и градусах согласно принятым калибровочным таблицам для названной аппаратуры.

Тогда уровень теплового сигнала буксы в квантах

$$U_p = \zeta(T_{HB}) \cdot \Delta T.$$

Первые два блока рассмотренного комплекса моделей относятся к функционированию объекта теплового контроля и могут быть названы нами для удобства «виртуальная букса», третий, четвертый и пятый блоки относятся к моделированию работы средства теплового контроля и могут быть названы «виртуальный прибор». «Виртуальная букса» и «виртуальный прибор» для каждого конкретного случая (типа подвижного состава, типа СТК) образуют виртуальную модель теплового контроля.

Согласно разработанных и приведенных выше математических моделей блоков 3–5 было разработано специальное программное обеспечение для компьютерной реализации «виртуального прибора». Программное обеспечение согласно алгоритму осуществляет считывание тепловых полей, полученных на термомеханической модели, обработку траектории сканирования, определение осциллограммы сигнала.

**В третьем разделе** диссертации приведены результаты разработки и реализации комплекса экспериментальных исследований работоспособного и предаварийного состояния буксовых узлов в контексте теплового контроля, оценки достоверности разработанных моделей и целесообразности реализованных технических решений в средствах теплового контроля. Рассмотрим комплекс по его составляющим – видам испытаний.

**Измерения температур буксовых узлов в эксплуатационных поездных условиях контактными датчиками температуры**  
 Данным видом испытаний решались следующие задачи.

1. *Исследование общего температурного состояния подшипников кассетного типа и наружных корпусов букс и полубукс (адаптеров) грузовых вагонов.*

2. *Подробное изучение распределений температур в зоне контроля КТСМ-02 (нижней части буксового узла) и верификация по экспериментальным данным моделей «виртуальная букса» и «виртуальный прибор».*

Испытания проводились контактными непрерывными измерениями температур букс вагонов опытного маршрута на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ (ст. Щербинка) ОАО «РЖД» 27–29 июня 2005 г. Для проведения контактных измерений температуры использовались автономные, цифровые термодатчики с памятью (рисунок 6а). Для исследования общего температурного состояния датчики устанавливались с помощью магнитного крепления на различные зоны снаружи букс, как показано на рисунке 6б, для подробного изучения распределения температур в нижней части буксового узла – согласно рисунку 6в. Для п. 2 одновременно фиксировались показания КТСМ–02 в квантах на исследуемые буксы при проходе поездом поста контроля. Продолжительность испытаний 15 часов (вечер-ночь-утро, включающие движение с постоянной скоростью, торможение, остановки поезда), интервал записи измерений температур в память датчика – 1 мин.

Полученные при контактных измерениях распределения температур буксовых узлов в поездных условиях и зарегистрированные при этом СТК КТСМ–02 значения уровней нагрева букс (в квантах), в сравнении с результатами расчетов температур на модели «виртуальная букса» и уровней нагрева в квантах на модели «виртуальный прибор», сопоставимы качественно и количественно (расхождение не более 10 %).

3. *Изучение стабильности температурного режима в зоне контроля буксовых узлов с кассетными подшипниками и оценки достоверности показаний аппаратуры теплового контроля (Северная ж.д.).*

Сопоставление результатов измерений температур на 24-х буксах контактными термодатчиками (рисунок 6г) в поездных условиях и одновременно бесконтактным способом с помощью КТСМ-02 показывает, что среднее расхождение измерений букс в зоне сканирования контактными способом и бесконтактным способом с помощью КТСМ-02 составляет 1,1 С (5,7%) (рисунок 7).

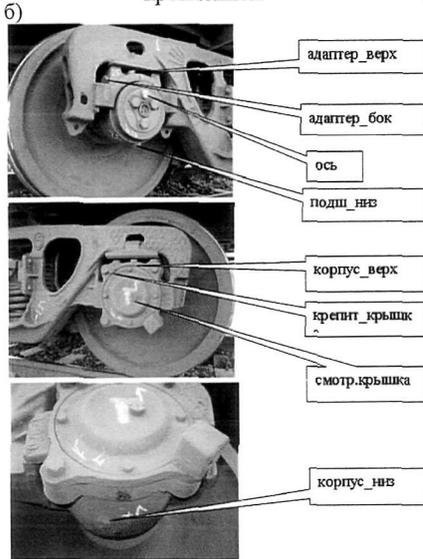
4. *Исследование температурного состояния кассетных подшипников и корпусов букс тележек скоростных (до 200 км/час) пассажирских поездов (Октябрьская ж.д. – Санкт Петербург – Москва).*

Результаты измерений (рисунок 6д) температур буксовых узлов на скоростных тележках модели 68-4076 показывают, что отношение средних значений относительных температур букс четных и нечетных осей (по ходу движения) измеряемых вагонов в контрольных точках при установившемся тепловом режиме работы букс составляет 1,28 (рисунок 8).

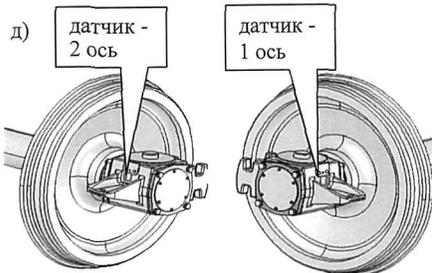
При смене направления движения поезда, менее нагретые буксы в направлении поезда в одну сторону на нечетных осях вагонов становятся более нагретыми в обратном направлении, т. к. эти оси становятся вторыми в



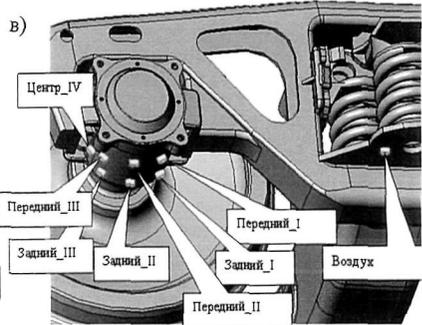
Термодатчик с магнитным креплением



Установка термодатчиков на буксовых узлах с корпусом и адаптером для изучения общего температурного режима (Экспериментальное кольцо)



Установка термодатчиков на корпусах буксовых узлов первой и второй осей тележки модели 68-4076 высокоскоростного пассажирского поезда «Невский экспресс» (Октябрьская ж.д.)



Установка термодатчиков при оценке распределения температур в нижней части корпуса буксы (Экспериментальное кольцо)



Место установки термодатчиков на корпусах буксовых узлов в зоне контроля КТСМ-02 (Северная ж.д.)



Рисунок 6 – Измерения температур буксовых узлов в эксплуатационных поездных условиях контактными датчиками температуры

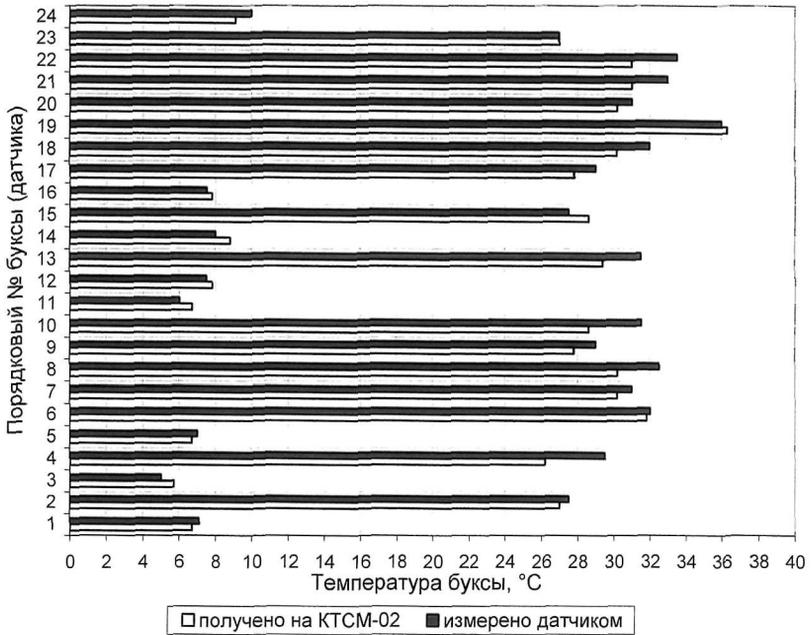


Рисунок 7 – Сопоставление результатов измерений температур корпусов букс контактными датчиками с показаниями КТСМ-02 в °С

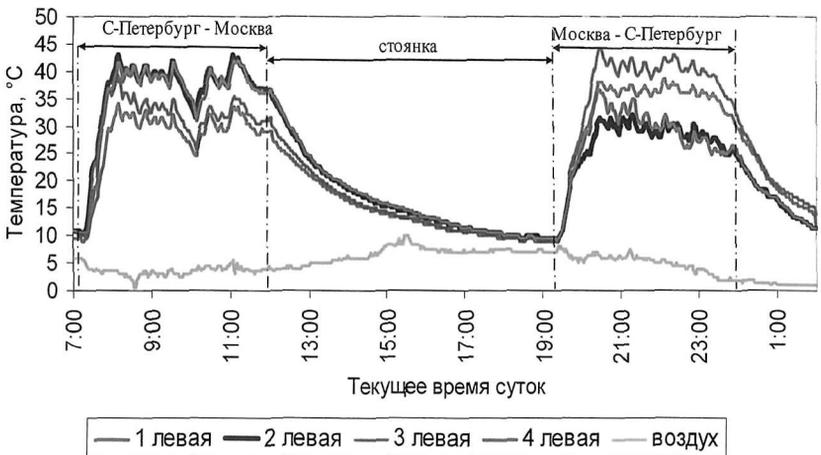


Рисунок 8 – График изменения во времени температур буксовых узлов за один полный рейс поезда «Невский экспресс» Санкт Петербург – Москва – Санкт Петербург

тележке по ходу движения и меняется их расположение по отношению к воздушному потоку.

Полученные при испытаниях выводы явились частью исследований причин систематически наблюдаемой разницы показаний аппаратуры КТСМ-01 на буксы четных и нечетных осей скоростных пассажирских поездов.

### Стендовые испытания в режиме эксплуатационных нагрузок с измерением температур на поверхности и внутри буксового узла

Испытаниям на специально разработанном стенде подвергалась ось колесной пары с буксовым узлом. Стенд позволяет имитировать действующие на буксовый узел радиальную и осевую нагрузки. Измерялись температуры наружных колец подшипников в 16 точках контактными термомпарами, установленными в специальные отверстия в корпусе буксы, и температуры корпуса в этих же сечениях бесконтактным пирометром. По результатам испытаний строились графики выхода на стационарный режим теплового состояния.

Решались следующие задачи:

1. *Изучение распределений температур, идентификация по экспериментальным данным параметров трения для термомеханической модели буксового узла, оценка достоверности моделей.*

2. *Оценка температур в роликах подшипников по специальной методике при выходе на стационарный режим. Подтверждение достоверности термомеханической модели буксового узла.*

Для определения температуры ролика изготавливался измерительный ролик с установленным в нем автономным термодатчиком. Сравнение графиков расчетных температур и полученных по результатам стендовых испытаний буксового узла (рисунок 9) показывает, что максимальное расхождение расчетов и измерений составило 9%. При этом расчетные температурные поля внутри подшипника согласуются с температурами, измерен-

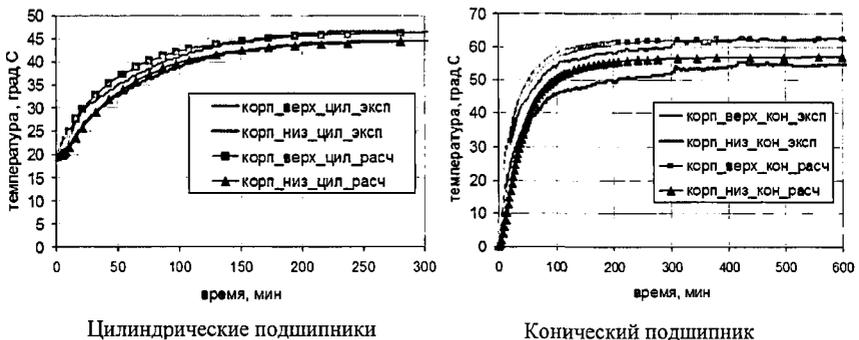


Рисунок 9 – Сравнение графиков расчетных и экспериментальных температур элементов корпуса буксы (выход на стационарный режим теплового состояния)

ными на роликах в процессе эксперимента, что характеризует достоверность и работоспособность созданной модели.

### **Стендовые испытания в режиме неисправностей буксового узла с измерением температур буксового узла**

Решались следующие задачи:

1. *Оценка темпа нарастания аварийных температур с разрушенным торцевым креплением и сдвигом корпуса буксы.*

Результаты стендовых испытаний по имитации аварийной ситуации со смещенным корпусом буксы показывают, что при нарушении или отсутствии торцевого крепления происходит процесс разрушения переднего подшипника, сопровождающийся временным заклиниванием роликов по торцам. При этом температура наружных колец и внешних поверхностей корпуса буксы не превышает минимальных пороговых значений тревожной сигнализации, принятых для настройки средств теплового контроля. В такой ситуации полностью исключить случаи несвоевременного обнаружения аварийного разрушения подшипников при нарушении торцевого крепления и сползании корпуса буксы только средствами теплового контроля нельзя.

2. *Оценка темпа нарастания аварийных температур с ослаблением посадки внутреннего кольца переднего подшипника.*

Испытания буксового узла с ослаблением посадки (проворот) внутреннего кольца переднего подшипника показывают, что темп нагрева наружного кольца в конечной фазе испытаний (12–15 минут от начала) – 4 °С/мин, торца оси – 10 °С/мин. Для сравнения, темп нагрева работоспособного подшипника при выходе на стационарный режим в стендовых условиях составляет 0,1–0,2 °С/мин в зависимости от значения осевой (аксиальной) нагрузки.

### **Подконтрольная эксплуатация с мониторингом нагрева буксовых узлов по показаниям бесконтактных напольных средств теплового контроля**

Решаемые задачи. *Статистическая и вероятностная оценка нагрева букс в процессе эксплуатации.*

Данный вид исследований проводился с использованием базы показаний СТК, пополняемой с установок на территории России и позволяющей решать множество задач теплового контроля. В автореферате приводится лишь один пример использования результатов статистических исследований, позволивших принять конкретные технические решения.

Наблюдение за опытной эксплуатацией составов с коническими подшипниками показало, что распределения уровней нагрева конических подшипников производства ЕПК на смазке Мобилит 221 носят двумодальный характер, то есть имеется тенденция деления букс на группы с «высоким» (относительно температуры воздуха 25–35 °С) и «низким» уровнем нагрева (относительно температуры воздуха 4–10 °С). Это явление было зарегистрировано также и при контактных измерениях температур букс с коническими подшипниками (см. рисунок 7). Наличие данного факта говорит о не-

стабильности параметров смазки и препятствует объективному выбору пороговых значений контроля. Предприятие-изготовитель осуществил замену на смазку Буксол и это привело к тому, что распределение принимает одномодальный характер и наиболее вероятный уровень нагрева букс с касетными подшипниками сосредоточился около одного значения.

**В четвертом разделе** приводятся результаты численного экспериментирования на разработанных моделях с целью получения необходимых для практического использования результатов, позволивших обосновать и внедрить конкретные технические решения в тепловой диагностике.

Для оценки общего температурного режима буксы в диапазоне температур окружающей среды от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  на термомеханической модели проводились расчеты полей температур (рисунок 10) при стационарном тепловом режиме при скорости движения поезда  $60\text{ км/час}$ .

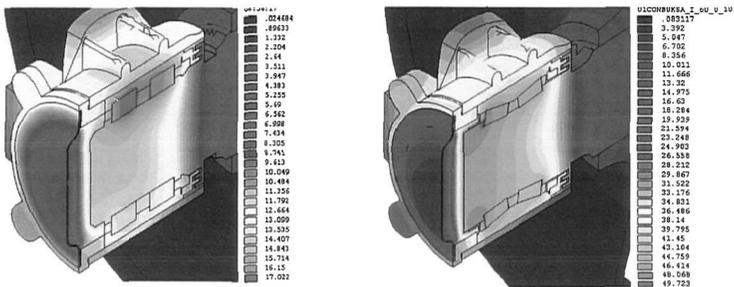


Рисунок 10 – Поля температур ( $^{\circ}\text{C}$ ) в буксах с различными подшипниками (температура воздуха  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Анализ построенной зависимости нагрева буксы в указанном диапазоне температур окружающей среды показывает, что относительная – избыточная температура деталей буксы при  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  больше в 2–3 раза, чем относительная температура этих же деталей при  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  окружающей среды. Это обусловлено зависимостью силы трения в подшипнике от температуры воздуха, что подтверждает нецелесообразность использования для оценки допустимого нагрева буксы только абсолютной температуры буксы.

При тепловом контроле по инфракрасному излучению от буксы важно установить влияние нагрева колеса на нагрев буксы при торможении колесным или дисковым тормозом, а также возникновении нештатных ситуаций, когда колесная пара вагонов по причине неисправности тормозов (неотпущенные или самопроизвольно сработавшие) перемещается с прижатыми к ободу колодками. Моделировались различные виды торможения: многократно повторяющееся, кратковременное, длительное, дисковое, а также движение с неотпущенными тормозами. Для упрощения во всех моделях использовалась букса грузового вагона. Анализ результатов, часть которых приведена на рисунке 11, показывает, что данные процессы незначительно сказываются на нагреве наружных контрольных

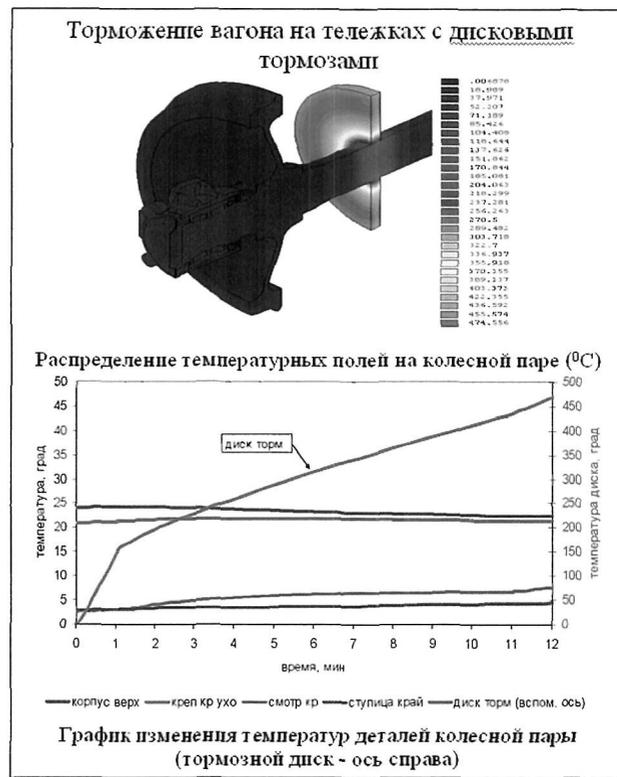
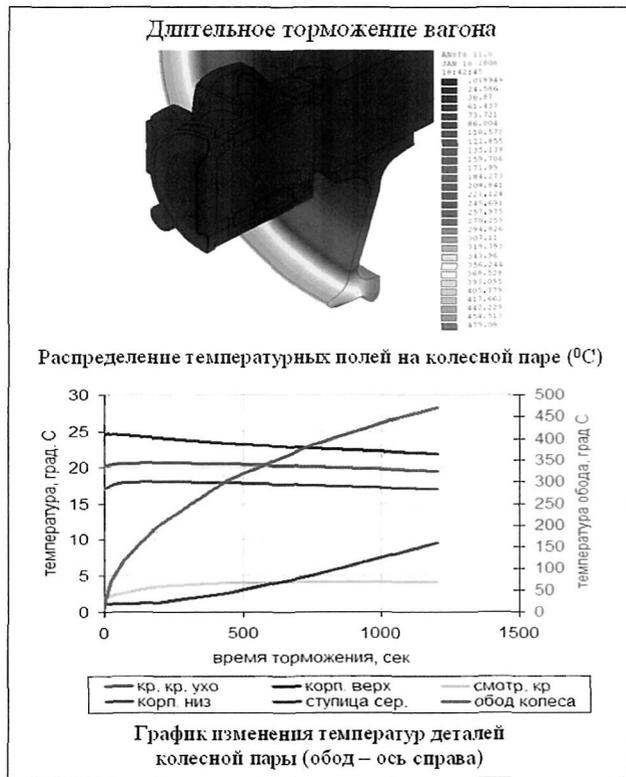


Рисунок 11 – Результаты моделирования нагрева деталей колесной пары при торможении

поверхностей буксового узла (в пределах погрешности напольных средств теплового контроля).

Как уже отмечалось, важным является то, какие детали буксового узла попадают в зону сканирования приемника инфракрасного излучения. Поэтому проектирование подвижного состава должно сопровождаться проверкой контролепригодности конструкции его ходовых частей к диагностике системами бесконтактного теплового контроля.

Основываясь на моделях «виртуальная букса» и «виртуальный прибор», была предложена расчетная методика оценки контролепригодности ходовых частей подвижного состава к тепловой бесконтактной диагностике букс. Методика может быть использована для оценки эффективности применяемых средств теплового контроля и при проектировании подвижного состава нового поколения.

Методика апробирована на скоростных тележках модели 68-4076 пассажирских вагонов в составах поездов типа «Невский экспресс». Анализ рассчитанных на модели (температура воздуха 0 °С, скорость движения вагона 180 км/час) полей скоростей обтекания на поверхностях тележки показывает, что по различным поверхностям корпуса буксы скорости обтекания на первой оси в 1,3–2 раза выше, чем на второй (рисунок 12). Это приводит к тому, что теплоотдача от буксы с соответствующих поверхностей в атмосферу на первой оси выше, чем на второй, а значит, температура этих поверхностей при одних и тех же технических состояниях подшипников будет ниже на первой оси, чем на второй. Выполненные расчеты на термомеханической модели буксового узла подтвердили это, так как полученные относительные температуры (разница между абсолютной и температурой воздуха) деталей букс первой и второй осей различаются в 1,3–1,7 раза в зависимости от выбранной зоны на корпусе буксы или подшипника. После тепло-

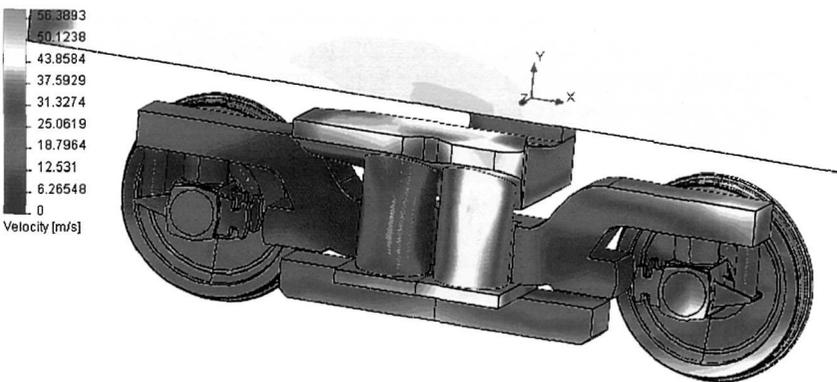


Рисунок 12 – Поля скоростей обтекания на поверхностях тележки модели 68–4076 при движении вагона со скоростью 180 км/час

вого расчета, следуя схеме исследований (см. рисунок 1), с использованием трехмерных компьютерных моделей выполнялось определение траектории сканирования букс тележки приемником ИК излучения средства теплового контроля, а также определение осциллограммы теплового сигнала, пропорционального считанной средней температуре (рисунок 13).

Анализ осциллограмм сигналов показывает, что при одинаковом техническом состоянии подшипников в буксах на первой и второй осях, тепловой сигнал, считываемый системой контроля КТСМ-01, с буквы на первой оси в 2,05 раза меньше (см. рисунок 13), чем с буквы на второй оси. Это происходит, как было показано моделированием, за счет неравнозначного обдува (охлаждения) букс на первой и второй осях, а также из-за считывания теплового сигнала при данной ориентации приемника с разных зон буксовых узлов нагретых неодинаково.

При контроле по нижней поверхности буквы (КТСМ-02) отличие амплитудных значений по буксам на первой и второй оси менее существенное (1,21 раза), как показывают аналогичные расчетные осциллограммы сигнала (см. рисунок 13, б). Это связано с тем, что контроль производится по одной и той же зоне поверхности букс и отличие значений амплитуд сигналов вызвано только аэродинамическими причинами.

Полученные результаты исследований контролепригодности тележек скоростных поездов послужили основанием для первоочередного оснащения установками КТСМ-02 основных магистралей ОАО «РЖД». Методика была использована также для обоснования внедрения на ОАО «РЖД» специализированных пунктов теплового контроля тягового подвижного состава с комбинированным использованием КТСМ-01 и КТСМ-02.

Разработанная термомеханическая модель позволяет моделировать распределение температур в буксовом узле в отдельных аварийных ситуациях, наиболее часто встречающихся в эксплуатации. Это касается процесса нарушения торцевого крепления подшипников со сдвигом буквы, а также процесса ослабления посадки внутренних колец подшипников. В разделе 3 диссертации приведены результаты экспериментального исследования ситуаций с данными неисправностями. По причине ограниченных возможностей применяемых технических средств при проведении стендовых испытаний исследовались только начальные стадии развития неисправных состояний буквы. В разделе 4 на модели прогнозировалось возможное развитие состояний буксового узла с указанными неисправностями.

При разрушенном торцевом креплении и последующем выходе из строя переднего подшипника, несмотря на нарушение геометрии (сдвиг роликов и кольца), может поддерживаться относительная временная работоспособность заднего подшипника в режиме эксплуатационных нагрузок радиального направления. Буксовый узел в этом состоянии с относительно работоспособным только задним подшипником может функционировать без аварийного нагрева определенное время (ограниченное продолжительностью действия на узел только радиальных нагрузок), при этом температу-

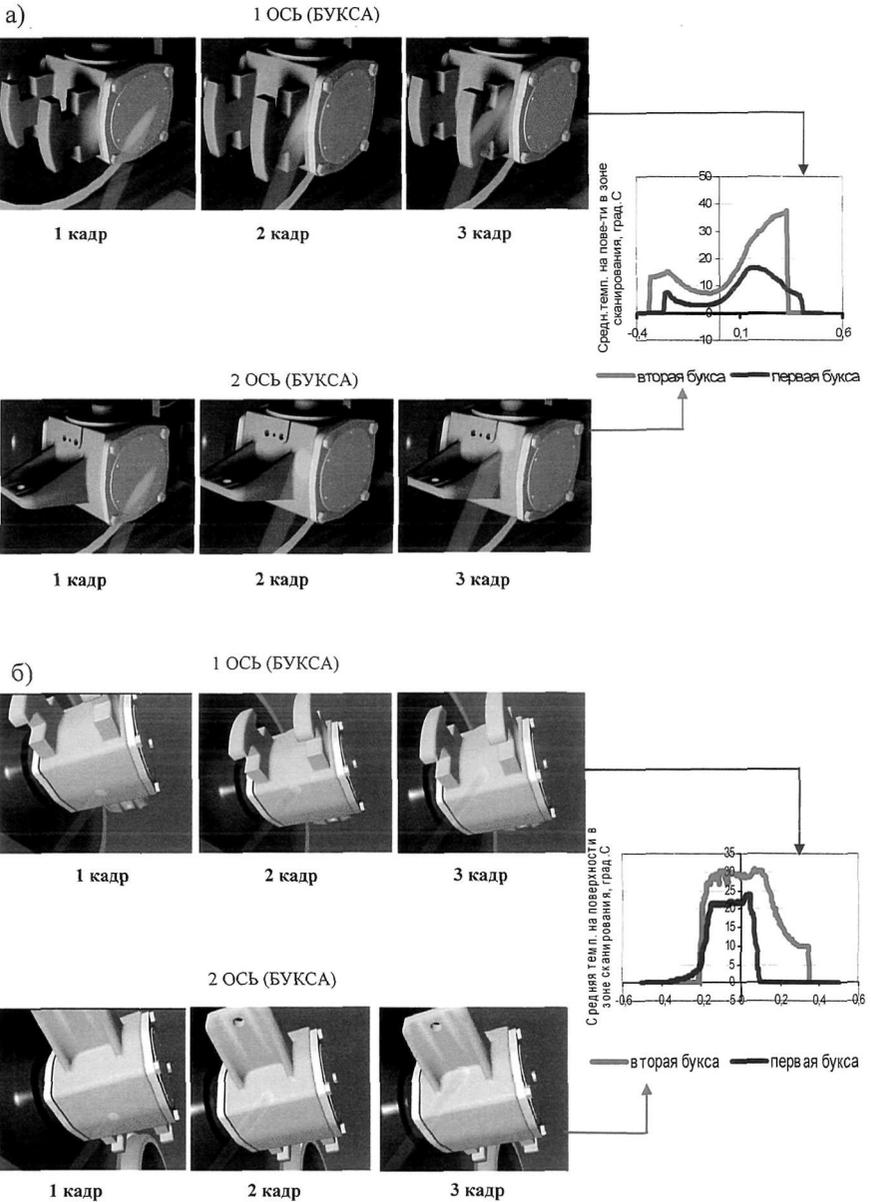


Рисунок 13 – Моделирование траектории сканирования приемником ИК излучения первой и второй букв тележки 68-4076 и соответствующие осциллограммы теплового сигнала на приемнике в интегральных температурах а) для КТСМ-01 б) для КТСМ-02

ра наружных колец и внешних поверхностей корпуса буксы не превышает минимальных пороговых значений, принятых для настройки средств теплового контроля. При последующем моделировании заклинивания роликов заднего подшипника, что может быть, как показал эксперимент, вызвано действием аксиальных сил на буксовый узел, заклинивание приводит к многократному увеличению темпа нагрева заднего подшипника. При этом аварийный темп разогрева подшипника и деталей буксового узла значительно выше, чем, если бы в буксе работали два подшипника при тех же условиях заклинивания роликов одного из подшипников.

В разделе 3 экспериментально установлено, что при ослаблении посадки внутреннего кольца на ось может возникнуть ситуация, когда внутреннее кольцо вследствие заклинивания роликов стоит на месте с обоймой роликов, а вращается ось внутри кольца. Поскольку данный режим является наиболее опасным с точки зрения развития аварийной ситуации, особенно в случае сухого трения между осью и внутренним кольцом, проведено моделирование данного процесса. Результаты моделирования показывают, что средний расчетный темп нагрева оси при провороте внутреннего кольца одного из подшипников в зависимости от параметров трения составляет от 8 до 37 °С/мин. Это говорит о том, что за 25 минут (интервал соответствует времени движения вагона на скорости 60 км/час между двумя соседними постами теплового контроля) от начала заклинивания роликов ось под проворачивающимся внутренним кольцом может нагреться в зависимости от условий трения от 266 до 800 °С. Это может служить основанием для определения рациональной величины уменьшения расстояния между пунктами теплового контроля.

**В пятом разделе** приводятся результаты разработки и технического воплощения распределенной системы теплового контроля и мониторинга нагрева буксовых узлов.

Многолетний опыт эксплуатации технических средств контроля показывает, что наилучшие результаты могут быть достигнуты при слежении за нагревом букс по нескольким постам контроля. Это позволяет применить новые диагностические признаки, связанные с динамикой нагрева буксы. С учетом структуры и принципов обслуживания подвижного состава в пути следования сформирована схема передачи информации от устройств контроля перегретых букс. В соответствии с данной схемой разработана архитектура распределенной системы. Архитектура сети системы имеет иерархическую топологию (рисунок 14). Таким образом, в соответствии со структурой организации ОАО «РЖД» структура распределенной системы, которая получила производственное название АСК ПС (Автоматизированная система контроля подвижного состава), строится с выделением следующих уровней:

1 уровень – Линейный (подсистема считывания и формирования диагностических данных, состоящая из средств теплового контроля на переездах, и подсистема концентрации информации от СТК);

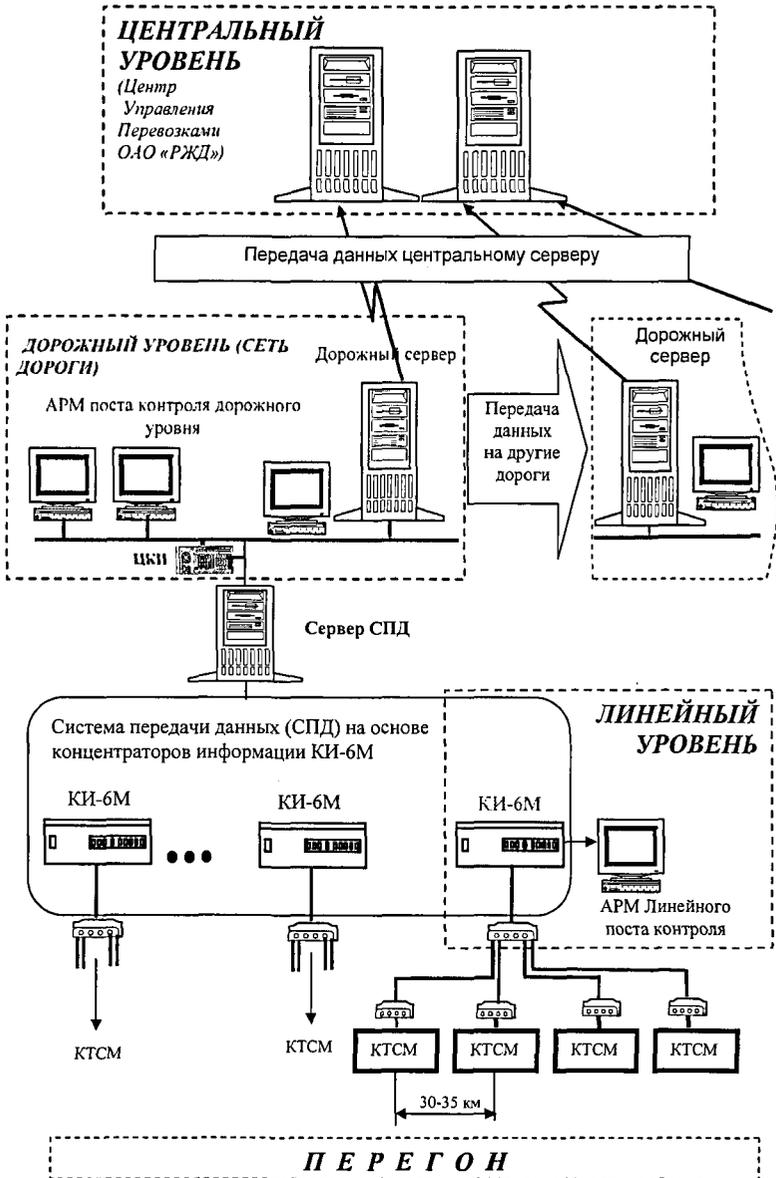


Рисунок 14 – Структура АСК ПС

- 2 уровень – Дорожный;
- 3 уровень – Центральный.

В состав *технических средств, образующих 1 уровень*, входит разработанный с использованием проведенных исследований КТСМ-02.

Создание КТСМ-02 (Комплекс Технических Средств Многофункциональный) базировалось на принципе построения многофункциональной напольной системы диагностики подвижного состава. В комплекс может включаться до пятнадцати подсистем контроля состояния подвижного состава, напольное оборудование которых с первичными преобразователями (датчиками и дополнительными устройствами) размещается на насыпи, рядом или на верхнем строении пути соответственно проводимым подсистемами измерениям. На основании выводов, полученных в исследованиях для напольного оборудования подсистемы КТСМ-02 Б (контроль нагрева букс) разработана специальная малогабаритная напольная камера КНМ-05, которая устанавливается на подошве рельса, как показано на рисунке 15.

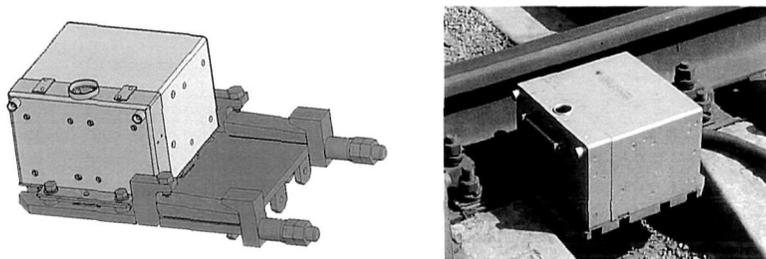


Рисунок 15 – Общий вид напольной камеры КТСМ-02 и ее расположения на рельсе

По важнейшим показателям назначения и экономическим показателям разработанный многофункциональный комплекс КТСМ-02 превосходит эксплуатируемые на железных дорогах ОАО «РЖД» средства теплового контроля буксовых узлов КТСМ-01 и КТСМ-01Д.

Согласно общей структурной схеме АСК ПС (см. рисунок 14) данные от подсистемы считывания (установок КТСМ) поступают в сеть передачи данных (СПД) на базе концентраторов информации КИ-6М, разработанных при участии автора. СПД предназначена для организации информационного обмена между территориально рассредоточенными источниками и потребителями информации с максимально эффективным использованием каналов и линий связи и ОАО «РЖД».

*Прикладное программное обеспечение АСК ПС* состоит из автоматизированных рабочих мест оператора линейного поста контроля (АРМ ЛПК) и центрального поста контроля (АРМ ЦПК), обеспечивает решение следующих основных задач:

- автоматический прием информации от средств теплового контроля;
- автоматическое формирование сигналов тревог и оповещения при

перегреве букс;

– просмотр и анализ архивов сохраненной информации в интерактивном режиме;

– выдачу архивных и статистических данных о работе СТК;

– изменение параметров настройки пороговых значений Тревог.

Программные средства АРМа ЦПК позволяют также осуществлять:

– слежение за развитием в поезде дефектов (мониторинг) на участке.

В основе *информационного обеспечения* распределенной системы теплового контроля лежит разработанная апостериорная модель распознавания классов состояния буксового узла. Разработка модели состоит из следующего:

– обоснование выбора диагностических признаков;

– расчетно-апостериорный метод определения контрольных значений диагностических признаков.

Согласно исследований, проведенных С.П. Лозинским, Е.Е. Трестманом, В.И. Самодуровым, В.Л. Образцовым, а также опыта эксплуатации СТК, накопленного автором данной работы, при тепловом контроле буксовых узлов могут использоваться несколько диагностических признаков.

На основании определения потенциальной информативности признаков и анализа исследований упомянутых авторов будем использовать два базовых признака распознавания: амплитуда сигнала букс (уровень –  $Ur$ ) и отношение амплитуды сигнала каждой буксы вагона к среднему значению амплитуд сигналов остальных букс  $Ur_{cp}$  по соответствующей стороне вагона (отношение –  $Otn$ ).

Рассмотрим полученные путем обработки сигналов от букс в эксплуатации распределения вероятности исправных и неисправных букс для двух диагностических признаков ( $Ur$ ,  $Otn$ ). Данные собирались на Свердловском отделении дороги от букс проходящих поездов с установок КТСМ-01 в течение 2006 года. Распределение вероятности для класса исправных состояло из выборки: 6 500 000 букс (апрель – декабрь 2006 года), для класса неисправных букс – выборки – 1200. На рисунке 16 приведено пересечение опытных распределений двух классов состояний букс. Задача распознавания состоит в определении уравнения линии вида  $D(Ur, Otn)$ , которая, проходя по рассматриваемому пространству (плоскости в нашем случае), минимизировала бы вероятность суммарной ошибки распознавания неисправных букс по двум признакам. Назовем эту линию для удобства пороговой кривой, которая определяет границу между классами разных состояний.

Аналитическое решение задачи определения разделяющей функции известными методами в условиях неоднозначности распределений (см. рисунок 16) приведет к большому числу ошибок распознавания, что недопустимо для железнодорожной отрасли.

Предложено пороговую кривую в пространстве значений признаков  $Ur$ ,  $Otn$  образовывать наложением трех пороговых ограничений (см. рису-

нок 16):

1) порог только по уровню относительной (избыточной) температуры нагрева буксы (признак  $Ur$ ), определенному предельно допускаемым в эксплуатации нагревом подшипников;

2) пороговое ограничение в зоне пересечения областей значений обоих признаков для классов исправных и неисправных букс (в так называемой «зоне неопределенности»);

3) пороговое ограничение для букс с большим нагревом относительно других букс в вагоне (признак  $Otn$ ).

Рассмотрим правила образования каждого порогового ограничения.

Для первого ограничения лимитирующей температурой нагрева служит абсолютное значение температуры недопустимого в эксплуатации процесса каплепадения смазки. Зная данную температуру, через коэффициент передачи относительной темпе-

ратуры с подшипника на зону контроля корпуса буксы (определенный с помощью термомеханической модели) находим пороговую относительную температуру на корпусе в зоне контроля.

Для второго ограничения в зоне неопределенности предлагается на базе имеющегося богатого статистического материала применить коэффи-

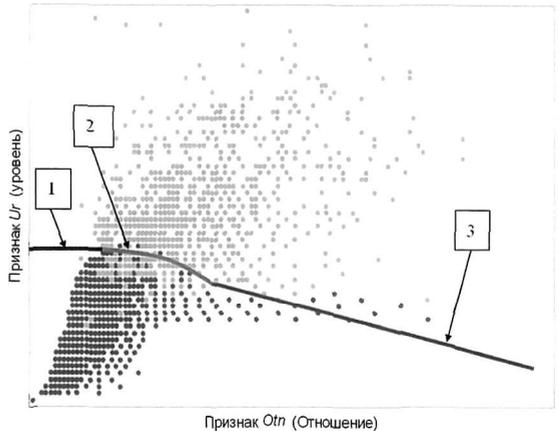
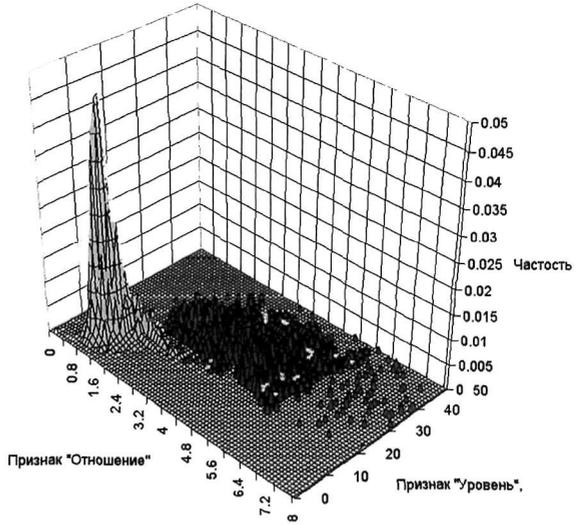


Рисунок 16 - Опытные распределения двух диагностических параметров ( $Ur$ ,  $Otn$ ) для классов исправных (зеленый) и неисправных (красный) букс и схема образования пороговой кривой

циент, представляющий соотношение количества (вероятности) неисправных букс к количеству исправных букс. Для одномерного распределения

$$K(Ur_{ноп}) = \frac{P_H(Ur_{ноп})}{P_{II}(Ur_{ноп})}.$$

Для двумерного (по двум признакам  $Ur, Otn$ ) запишется в виде

$$K(Ur, Otn) = \frac{P_{HII}(Ur, Otn)}{P_{II}(Ur, Otn)} = \frac{f_H(Ur, Otn)}{f_{II}(Ur, Otn)} \cdot \frac{N_{II}}{N_H},$$

где  $P_H(Ur, Otn)$ ,  $P_{II}(Ur, Otn)$  – частоты неисправных и исправных букс;

$f_H(Ur, Otn)$ ,  $f_{II}(Ur, Otn)$  – частота неисправных и исправных букс;

$N_H$ ,  $N_{II}$  – общее количество неисправных и исправных букс.

В результате по рассчитанным принятым диапазонам значений коэффициента  $K$  можем построить множество пороговых кривых для зоны 2, каждая из которых будет отражать определенную известную нам степень риска от минимального значения до максимального.

Для третьего ограничения для букс с высоким относительным нагревом необходимо использование нового признака, производного от признаков  $Ur$  и  $Otn$  (признак «Разность»):

$$P_i = Ur_i - Ur_{cp} = Ur_i(1 - 1/Otn_i).$$

Разность значений признака  $Ur$  рассматриваемой буксы и среднего значения по вагону  $Ur_{cp}$  можно трактовать как перегрев буксы относительно «нормального» уровня нагрева для данного режима. Потенциал признака «Разность» можно повысить за счет применения статистического алгоритма расчета «нормального» уровня нагрева букс.

С использованием разработанной апостериорной методики определения порогов теплового контроля выбираются соответствующие пороговые значения для СТК на территории России и утверждаются ОАО «РЖД».

В заключение остановимся кратко на основных результатах внедрения программно-технических средств распределенной системы теплового контроля и мониторинга нагрева буксовых узлов. В диссертации приводится график влияния объема внедрения КТСМ по годам на уменьшение браков по буксовому узлу. Напомним, что браки по буксовому узлу составляют около 60 % всех браков по вагонному хозяйству. В диссертации приведены также графики, которые показывают, что с увеличением объемов внедрения КТСМ и АСК ПС на сети дорог происходит снижение задержек поездов и снижение отказов средств теплового контроля.

По данным Департамента вагонного хозяйства о работе СТК за 1-е полугодие 2008 г., в диссертации выполнена оценка вероятностных характеристик работы распределенной системы контроля и мониторинга на сети дорог ОАО «РЖД». Получены следующие значения: вероятность ложной тревоги  $P_{лт} = 6,48 \times 10^{-8}$  и вероятность пропуска неисправных букс:  $P_{пр} = 3,55 \times 10^{-10}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны условия реализации предложенного метода исследования бесконтактного теплового контроля различных типов буксовых узлов с цилиндрическими и коническими роликподшипниками, что обеспечило получение научно обоснованных технических решений, внедрение которых повышает безопасность движения железнодорожного транспорта России и СНГ.

Нижеприведенные выводы, результаты и рекомендации являются основными составными частями решенной проблемы.

1. Впервые создан комплекс математических моделей бесконтактного теплового контроля, системно интегрирующий моделирование следующих процессов: действие нагрузок на буксовый узел во время движения вагона; выделения тепла в зонах трения; распространения тепловых потоков от подшипников к шейке оси и к наружным поверхностям, доступным для теплового контроля зон корпусов букс; излучения тепловой энергии с поверхности буксы в ИК области спектра; восприятия ИК излучения приемником напольных средств контроля при воздействии различных дестабилизирующих факторов внешней среды с учетом различных геометрических параметров корпусов букс и ориентации сканирующей системы.

Вычислительная реализация комплекса математических моделей позволяет проводить имитационное моделирование процессов теплового контроля и разрабатывать рекомендации по созданию новых систем теплового контроля и совершенствованию технологии контроля базовыми системами, существенно сократив объем экспериментальных исследований.

2. Разработан и реализован комплекс экспериментальных исследований для изучения температурных режимов буксовых узлов с различными типами подшипников в работоспособном и предаварийном состояниях при наличии наиболее часто возникающих в эксплуатации неисправностей. Комплекс включает в себя исследования на стенде, в поездных условиях и в процессе подконтрольной эксплуатации с контактными и бесконтактными измерениями температур и относительных уровней нагрева буксовых узлов.

3. Полученные при инструментальных измерениях распределения температур буксовых узлов в поездных и стендовых условиях, в сравнении с результатами расчетов на термомеханической модели, сопоставимы качественно и количественно (расхождение не более 10 %).

4. Разработана на базе созданных математических моделей методика оценки контролепригодности ходовых частей подвижного состава к тепловой бесконтактной диагностике букс, которая может быть использована для оценки эффективности применяемых средств теплового контроля и при проектировании нового подвижного состава.

Методика применена для оценки контролепригодности буксовых узлов локомотивов постоянного и переменного тока различных серий, грузо-

вых и пассажирских вагонов нового поколения, в том числе с коническими подшипниками кассетного типа. Результатом применения методики явилось:

- обоснование преимуществ контроля установками КТСМ-02 высокоскоростного пассажирского подвижного состава на тележках моделей 68-4076, 68-4075, что было в первую очередь внедрено (замена КТСМ-01 на КТСМ-02) на магистралях ОАО «РЖД» с высокоскоростным движением;
- для обеспечения полноценного контроля буксовых узлов локомотивов обосновано комбинированное применение установок КТСМ-01 и КТСМ-02, что привело к созданию на железных дорогах ОАО «РЖД» специализированных пунктов контроля.

5. Исследованиями на моделях установлено, что нагрев колес при различных режимах торможения (кратковременном, длительном) колодочным тормозом, а также при движении с неотпущенными тормозами, незначительно сказывается на нагреве буксовых узлов (в пределах погрешности напольных средств теплового контроля). Нагрев тормозных дисков скоростных пассажирских вагонов при различных режимах торможения также не сказывается на нагреве буксового узла.

Характер нагрева колеса при тормозных процессах показывает, что для создания систем контроля неотпущенных тормозов по нагреву колес наиболее эффективной зоной контроля является обод колеса и диск.

6. При оценке влияния нагрева неисправной буксы на элементы колеса получено, что при заклинивании роликов между кольцами подшипников средний темп нагрева поверхности корпуса буксы составляет 1,06 °С/мин, при этом темп нагрева поверхности ступицы колеса:

- при заклинивании заднего подшипника составляет 0,29 °С/мин;
- при заклинивании переднего подшипника – 0,16 °С/мин.

Это означает, что температура ступицы при неисправном переднем подшипнике в 6 раз меньше, а при неисправном заднем – в 3,7 раза меньше, чем температура корпуса буксы. Это доказывает нецелесообразность использования для контроля буксовых узлов вспомогательных напольных камер, в которых приемник ориентирован на ступицу колеса.

7. Результаты стендовых испытаний и моделирования аварийного состояния буксового узла с часто встречающейся неисправностью – разрушенным торцевым креплением и смещением корпуса буксы – показывают, что несмотря на последующий выход из строя переднего подшипника может поддерживаться относительная временная работоспособность заднего подшипника в режиме эксплуатационных нагрузок только радиального направления. При этом температура наружных колец и внешних поверхностей корпуса буксы не превышает минимальных пороговых значений, принятых для настройки средств теплового контроля. При такой ситуации полностью исключить случаи несвоевременного обнаружения аварийного разрушения подшипников при нарушении торцевого крепления и сползании корпуса буксы только средствами теплового контроля нельзя.

8. На основе полученных и обоснованных в работе решений создания и совершенствования систем теплового контроля букс:

- разработано техническое и программное обеспечение принципиально новой многофункциональной напольной системы диагностики подвижного состава КТСМ-02, состоящей из действующих подсистем обнаружения перегретых букс КТСМ-02Б и неисправностей тормозного оборудования КТСМ-02Т, с возможностью подключения к базовой системе подсистем контроля других параметров технического состояния подвижного состава;

- разработаны рекомендации по повышению эффективности контроля букс разнотипного подвижного состава средствами КТСМ-01.

9. С учетом структуры и принципов обслуживания подвижного состава в пути следования разработана и технически реализована архитектура распределенной системы теплового контроля и мониторинга нагрева буксовых узлов (АСК ПС) отраслевого назначения.

Для функционирования АСК ПС разработано программное обеспечение автоматизированных рабочих мест оператора линейного поста контроля (АРМ ЛПК) и центрального поста контроля (АРМ ЦПК), которые обеспечивают решение основных задач контроля и диагностики.

10. Для информационного обеспечения АСК ПС в части статистического распознавания класса перегретых (неисправных) букс разработана апостериорная модель, позволяющая определять пороговые значения диагностических признаков в зависимости от сезона, характера участка.

Оцененные по данным эксплуатации сети дорог ОАО «РЖД» за 1-е полугодие 2007 и 2008 гг. значения характеристик работы распределенной системы контроля и мониторинга АСК ПС:

- вероятность ложной тревоги (2008 год –  $6,48 \times 10^{-8}$ ; 2007 год –  $9,08 \times 10^{-8}$ ),

- вероятность пропуска неисправной буксы (2008 год –  $3,55 \times 10^{-10}$ ; 2007 год –  $3,79 \times 10^{-10}$ )

свидетельствуют о рациональном выборе пороговых значений контроля нагрева букс и эффективности работы всех подсистем распределенной системы контроля и мониторинга.

11. По основным техническим характеристикам, влияющим на технико-экономическую эффективность средств теплового контроля, КТСМ-02 имеет преимущество перед КТСМ-01. Годовой экономический эффект от внедрения КТСМ-02 в расчете на одну единицу равен 144,7 тыс. руб.

**Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Миронов А.А. Имитационная модель функционирования аппаратуры теплового контроля буксовых узлов подвижного состава // Транспорт, наука, техника, управление.– 2009.–№5. –С. 8-14.

2. Миронов А.А. Создание отраслевой системы мониторинга безопасности железнодорожного подвижного состава в пути следования // Транспорт Урала. – 2006. – № 2(9). – С. 42–47.

3. Миронов А.А. Виртуальная модель бесконтактного теплового контроля буксовых узлов подвижного состава // Транспорт Урала. – 2008. – № 3(18). – С. 59–65.

4. Миронов А.А., Образцов В.Л., Павлюков А.Э. Температурный режим буксового узла при нарушении торцевого крепления и тепловой контроль // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 6. – С. 60–61.

5. Миронов А.А., Занкович А.В., Павлюков А.Э. Исследование термонагруженности буксового узла с кассетным подшипником // Транспорт Урала. – 2005. – № 6. – С. 54–61.

6. Миронов А.А., Салтыков Д.Н., Образцов В.Л., Павлюков А.Э. Оценка пороговых значений в задаче диагностики букс подвижного состава по тепловым признакам // Транспорт Урала. – 2007. – № 3(14). – С. 69–73.

7. Миронов А.А., Образцов В.Л., Павлюков А.Э. О взаимном нагреве колеса и буксового узла в процессе эксплуатации подвижного состава // Транспорт Урала. – 2008. – № 4(19). – С. 24–29.

8. Миронов А.А., Образцов В.Л., Павлюков А.Э. Контроль нагрева букс и безопасность движения высокоскоростного подвижного состава // Транспорт Урала. – 2009. – № 1(20). – С. 50–54.

9. Павлюков А.Э., Миронов А.А., Занкович А.В. Диагностическая модель бесконтактного теплового контроля букс подвижного состава // Транспорт Урала. – 2004. – № 2. – С. 44–52.

10. Салтыков Д.Н., Павлюков А.Э., Миронов А.А. Исследование и разработка новых технических решений повышения безопасности движения железнодорожного транспорта//Транспорт Урала.– 2006.– №3(10).–С.35–40.

11. Миронов А.А., Павлюков А.Э., Образцов В.Л., Занкович А.В. Моделирование температурных полей буксового узла с цилиндрическими и коническими роликовыми подшипниками // Вестник ВНИИЖТ. – 2007. – № 2. – С. 37–40.

12. Миронов А.А., Ефимов В.П., Павлюков А.Э. Буксовый узел тележки – преемственность технологий моделирования при решении задач жизненного цикла // Тяжелое машиностроение. – 2005. – № 8. – С. 29–33.

13. Миронов А.А., Образцов В.Л., Митюшев В.С., Салтыков Д.Н. Тепловой контроль буксовых узлов инфракрасной оптикой // Локомотив. – 2008. – № 4. – С. 29–32

14. Пат. 2340496 Российская Федерация, МКИ В 61 К 9/06. Способ обнаружения заторможенных колесных пар рельсового подвижного состава / Митюшев В.С., Мозжевилов А.Б., Миронов А. А., Лядов В.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Инфотэкс АТ». – №2006129417/11; заявл. 14.08.08; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34.–2с.: ил.

15. Пат. 2350502 Российская Федерация, МКИ В 61 К 9/04. Устройство для настройки средств теплового контроля ходовых частей подвижного состава / Лядов В.В., Миронов А.А., Образцов В.Л., Пигалев Н.Г.; заявитель и патентообладатель ООО «Инфотэкс АТ». – № 2007135465/11; заявл. 24.09.07; опубл. 27.03.09, Бюл. № 9.–2с.: ил.

16. Пат. 2281873 Российская Федерация, МКИ В 61 Н 11/02. Устройство для автоматического торможения подвижного состава при сходе с рельсов / Салтыков Д.Н., Павлюков А.Э., Миронов А.А., Балабанов Е.В.; заявитель и патентообладатель Уральск. гос. ун-т путей. сообщ. – №2005104514/11; заявл. 18.02.2005; опубл. 20.08.06, Бюл. № 23.–2с.: ил.

17. Решение ФИПС от 27.04.09 о выдаче патента Российской Федерации на изобретение. МПК В61К 9/06(2006.01). Напольная камера устройства для теплового контроля ходовых частей рельсового подвижного состава / Балабанов Е.В., Лядов В.В., Миронов А.А., Мозжевиллов А.Б., Образцов В.Л., Пигалев Н.Г.; заявитель и патентообладатель ООО «Инфотэкс АТ». – № 2008111204/11; заявл. 24.03.08; публ. заявки 27.09.09, Бюл. №27.

18. Миронов А.А. Новые функциональные возможности комплексов КТСМ и систем централизованного контроля АСК ПС // Автоматика, связь, информатика. – 2005. – № 12. – С. 64–67.

19. Миронов А.А. Перспективные направления совершенствования средств контроля типа КТСМ-02 и АСК ПС // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 1. – С. 34–37.

20. Миронов А.А., Тагиров А.Ф. Применение комплектов КТСМ в современных условиях // Автоматика, связь, информатика. – 2002.– № 9. – С. 5–9.

21. Миронов А.А., Образцов В.Л., Павлюков А.Э. Резервы повышения эффективности тепловой диагностики буксовых узлов // Автоматика, связь, информатика. – 2004. – № 2. – С. 5–9.

22. Миронов А.А., Образцов В.Л., Соболев В.Я., Григорьев К.В. Анализ опыта эксплуатации технических средств контроля ходовых частей подвижного состава в движущихся поездах // Автоматика, связь, информатика. – 2005. – № 3. – С. 28–30.

23. Миронов А.А., Образцов В.Л., Соболев В.Я., Григорьев К.В. Анализ опыта эксплуатации технических средств контроля ходовых частей подвижного состава в движущихся поездах // Автоматика, связь, информатика. – 2005. – № 5. – С. 31–34.

24. Миронов А.А., Образцов В.Л., Павлюков А.Э. Контролепригодность подвижного состава к тепловой бесконтактной диагностике // Автоматика, связь, информатика. – 2006. – № 11. – С. 54–57.

25. Миронов А.А., Образцов В.Л., Павлюков А.Э., Митюшев В.С., Пигалев Н.Г. Тепловая диагностика подшипников кассетного типа грузовых вагонов // Автоматика, связь, информатика. – 2007. – № 9. – С. 12–14.

26. Миронов А.А., Образцов В.Л., Павлюков А.Э., Митюшев В.С., Пигалев Н.Г. Тепловая диагностика подшипников кассетного типа пассажирских вагонов // Автоматика, связь, информатика. – 2007. – № 10. – С. 20–22.

27. Миронов А.А., Образцов В.Л., Павлюков А.Э. Технические средства диагностики ходовых частей подвижного состава // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2005. – № 2. – С. 4–46.

28. Миронов А.А., Образцов В.Л., Пигалев Н.Г., Павлюков А.Э. Особенности теплового контроля буксовых узлов со смещением корпуса // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2005. – № 3. – С. 44–47.

29. Миронов А.А., Павлюков А.Э., Образцов В.Л., Пигалев Н.Г. Температурные режимы работы букс // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2006. – № 3(7). – С. 8–13.

30. Миронов А.А., Митюшев В.С., Григорьев К.В., Образцов В.Л. Распознавание буксовых узлов по тепловым сигналам // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2007. – N 3. – С. 42–45.

31. Григорьев К.В., Миронов А.А., Митюшев В.С., Образцов В.Л. Контролировать нагрев буксовых узлов будут в градусах // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2009. – N 2. – С. 22–24.

32. Миронов А.А. Расчет теплообразования в вагонной буксе с роликовыми подшипниками цилиндрического типа // Безопасность движения, совершенствование конструкций вагонов и ресурсосберегающие технологии в вагонном хозяйстве: сб. науч. тр. / под ред. проф. А.В. Смольянинова. – Екатеринбург: УрГУПС. – 2006. – № 38(121). – С. 66–70.

33. Миронов А.А., Образцов В.Л., Занкович А.В., Пигалев Н.Г., Балабанов Е.В., Павлюков А.Э. Кинетика разрушения роликовых подшипников и обнаружение неисправностей букс средствами тепловой диагностики // Безопасность движения, совершенствование конструкций вагонов и ресурсосберегающие технологии в вагонном хозяйстве: сб. науч. тр. / под ред. проф. А.В. Смольянинова. – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – № 38(121). – С. 71–85.

34. Миронов А.А. Ретроспективные аспекты создания, совершенствования и модернизации тепловой диагностики перегретых букс // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УрГУПС, 2003. – Т. 1. – С. 165–172.

35. Миронов А.А., Павлюков А.Э., Занкович А.В. Разработка термомеханической модели работы буксового узла грузового железнодорожного вагона. Механика и процессы управления: труды 34-го Уральского семинара по механике и процессам управления УРО РАН. – Екатеринбург : Ред. Миасского науч. центра, 2004. – Т. 2. – С. 188–197.

36. Миронов А.А., Кораблев П.А. Информационная система контроля подвижного состава. Современные информационные технологии, электронные системы и приборы железнодорожного транспорта: сб. науч. тр. / под ред. д-ра техн. наук Б.С. Сергеева. – Екатеринбург: УрГУПС, 2005. – С. 92–97.

37. Миронов А.А. Обоснование критериев тепловой бесконтактной диагностики букс подвижного состава // Безопасность движения поездов: Тр. VI-й науч.-практ. конф. – М.: МИИТ, 2005. – С. VII–17–VII–18.

38. Миронов А.А. Автоматизация контроля нагрева букс подвижного состава // Проблемы и перспективы железнодорожного транспорта: Тез. LXVI Междунар. науч.-практ. конф. – Д.; ДИИТ, 2006. – С. 74.

39. Миронов А.А., Тагиров А.Ф., Образцов В.Л. Автоматизированная система контроля подвижного состава (АСК ПС). Безопасность движения, совершенствование конструкций вагонов и ресурсосберегающие технологии в вагонном хозяйстве: сб. науч. тр. / под ред. проф. А.В. Смольянинова. – Екатеринбург: УрГУПС, 2003. – С. 65–70.

40. Миронов А.А., Образцов В.Л. О стратегии и средствах реализации систем комплексного контроля технического состояния подвижного состава в пути следования // Безопасность движения поездов: Тр. науч.-практ. конф. – М.: МИИТ, 2003. – С. IV–60–IV–61.

41. Миронов А.А. Вероятностный и детерминированный подходы к задаче бесконтактного теплового диагностирования подшипников железнодорожных вагонов // Наука, техника и высшее образование: проблемы и тенденции развития: сб. науч. тр. / под ред. проф. В.П. Мозолина, проф. А.Л. Голубенко. – Изд-во Рост. ун-та, 2006. – С. 148–149.

42. Миронов А.А. Вычислительная технология оценки приспособленности проектируемых ходовых частей подвижного состава к тепловой бесконтактной диагностике букс // Безопасность движения поездов.: Тр. VII-й науч.-практ. конф. – М.: МИИТ, 2006. – С. V–25–V–26.

43. Миронов А.А., Образцов В.Л., Пигалев Н.Г., Павлюков А.Э. Совершенствование средств тепловой диагностики букс для повышения уровня безопасности движения // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УрГУПС, 2003. – Т. 1. – С. 84–94.

44. Миронов А.А., Занкович А.В., Павлюков А.Э. Моделирование температурного поля вагонной буксы с коническими подшипниками касетного типа. Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: IV-я Междунар. науч.-техн. конф.: Тез. докл. – СПб., 2005. – С. 144–146.

Миронов Александр Анатольевич

**НАУЧНЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
БЕСКОНТАКТНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ БУКС  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов  
и электрификация

Сдано в набор 15.10.2009  
Формат бумаги 60x84 1/16  
Заказ № 34

Подписано к печати 13.10.2009  
Объем 2,75 п.л.  
Тираж 150 экз.

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