

На правах рукописи



**Тихонов Виктор Артурович**

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ БАНДАЖЕЙ  
КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОВОЗОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ  
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

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

**Научный руководитель – Буйносов Александр Петрович**, доктор технических наук, доцент.

**Официальные оппоненты:**

Рауба Александр Александрович, доктор технических наук, доцент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».

Воробьев Александр Алфеевич, кандидат технических наук, доцент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», доцент кафедры «Технология металлов».

**Ведущая организация –** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО СамГУПС).

Защита состоится «05» июня 2015 г., в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. Б2-15 – зал диссертационных советов.

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

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



Тимухина Елена Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Электровозы ВЛ11 всех индексов составляют более 50 % парка грузовых локомотивов, обслуживающих электрифицированные участки на полигоне Свердловской, Южно-Уральской и Западно-Сибирской железных дорог. Экипажная часть этих электровозов имеет ряд конструктивных недостатков, которые приводят, в том числе, к повышенному износу бандажей колесных пар. Проведение капитальных ремонтов (КРП) не решает проблему, и при этом увеличивает срок службы локомотивов всего на 15 лет. Отказы бандажей в эксплуатации составляют до 15 % от общего числа неисправностей на плановых и неплановых ремонтах электровозов. При этом методы повышения ресурса бандажей колесных пар, применяемые в настоящее время, как при независимом, так и при комплексном использовании не позволяют обеспечить ресурс на уровне, заданном программой «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года», утвержденной распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации №1032-р от 11 июня 2014 г. Перспективным методом, который показал высокую эффективность при обработке пар трения, является использование триботехнических составов. В связи с разработкой и внедрением измерительного инструмента повышенной точности стало возможным повысить точность прогнозирования ресурса бандажей колесных пар.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблеме повышенного изнашивания бандажей колесных пар локомотивов, а также способам повышения их долговечности посвящены труды многих исследователей. Ученые, на работы которых опирался автор: С. М. Андриевский, В. Р. Асадченко, Ю. А. Бабич, В. М. Богданов, А. П. Буйносов, А. А. Воробьев, М. И. Глушко, А. Л. Голубенко, А. В. Горский, В. П. Девяткин, И. А. Иванов, И. И. Калкер, А. Я. Коган, Д. А. Курасов, И. В. Крагельский, И. А. Майба, Ю. Е. Просвиров, А. А. Рауба, Д. Л. Худояров, И. С. Цихалевский и другие исследователи.

В рамках исследования произведена разработка математической модели изнашивания бандажей, в данном направлении автор опирался на научные работы в области моделирования динамики подвижного состава отечественных и зарубежных авторов. Это ученые: И. В. Бирюков, Е. П. Блохин, Г. П. Бурчак, М. Ф. Вер-

го, С. В. Вершинский, В. К. Гарг, Р. В. Дуккипати, И. А. Добычин, В. Н. Иванов, В. А. Камаев, В. С. Коссов, В. Б. Медель, А. Э. Павлюков, Д. Ю. Погорелов, Ю. С. Ромен, А. Н. Савоськин, Х. Т. Туранов, А. А. Хохлов, В. В. Хусидов.

**Объект исследования:** колесная пара электровоза.

**Предмет исследования:** способ повышения ресурса бандажей колесных пар с помощью обработки триботехническими составами.

**Цель работы:** увеличение долговечности бандажей колесных пар грузовых электровозов в эксплуатации за счет повышения эффективности применения триботехнических составов.

**Задачи исследования:**

- выполнение анализа причин выхода из строя бандажей колесных пар и применяемых в настоящее время методов повышения их ресурса;
- обоснование целесообразности применения триботехнических составов на основе серпентина для обработки бандажей колесных пар;
- разработка математической модели процесса изнашивания бандажей колесных пар с учетом использования триботехнических составов;
- совершенствование методики расчета ресурса до обточки и смены бандажей колесных пар электровозов;
- проведение экспериментальных и лабораторных исследований в условиях эксплуатации для оценки эффективности применения триботехнических составов для обработки бандажей колесных пар;
- разработка технологических решений, позволяющих повысить эффективность триботехнических составов и расчет технико-экономического эффекта от их применения.

**Научная новизна работы:**

- разработана математическая модель контакта колеса и рельса, учитывающая влияние триботехнических составов на интенсивность изнашивания бандажей;
- получены уравнения полиномиальной регрессии, которые позволяют прогнозировать с заданной точностью межремонтный пробег бандажей по их износу, определены степени полиномов зависимостей контролируемых параметров (нарастания проката, уменьшения толщины гребня и бандажа) от пробега электровозов, позволяющие получить наибольшую точность прогнозирования;

– исследовано влияние конфигурации профиля рабочей поверхности гребневой тормозной колодки на эффективность использования триботехнических составов НИОД-2 и НИОД-5.

#### **Практическая значимость работы:**

– разработана модель, использование которой позволяет обосновать выбор триботехнического состава по критерию реализации максимального ресурса бандажей, с учетом условий эксплуатации электровоза;

– предложена методика оценки ресурса бандажей, применение которой позволяет на 5–7 % уменьшить число отказов колесных пар электровозов до наступления их предельного износа за счет увеличения точности прогнозирования;

– реализован комплекс рекомендаций по обработке гребней триботехническими составами, позволяющий увеличить ресурс бандажей в 1,38 раза и повысить надежность работы колесных пар электровозов.

Материалы, представленные в диссертации, являются составной частью научно-исследовательских работ УрГУПС по разработке методов повышения ресурса бандажей колесных пар тягового подвижного состава.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использованы методы и положения теории механики твердого тела, трибологии, математического анализа, математического моделирования, планирования эксперимента, конечно-элементных расчетов. Подготовка трехмерной модели секции электровоза ВЛ11К и первичный инженерный анализ составных элементов произведен с помощью программных пакетов АСКОН КОМПАС-3D и Autodesk Inventor. Математическое моделирование и аналитические расчеты выполнены в среде PTC Mathcad, для трехмерного моделирования использован программный пакет «Универсальный механизм». Задачи математической статистики решены с помощью программ Statsoft STATISTICA и Microsoft Excel. Для исследований с применением метода конечных элементов использован пакет Comsol Multiphysics. Экспериментальная часть включает в себя натурные испытания бандажей колесных пар и последующую обработку экспериментальных данных на основании положений теории вероятности и математической статистики.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

– математическая модель механической системы секции электровоза

ВЛ11К, позволяющая определить нагрузки в контакте колеса и рельса при движении локомотива с составом по реальному участку с учетом особенностей экипажной части и неровностей рельсового пути;

– математическая модель изнашивания бандажей колесных пар, в которой учитываются параметры, определяющие наличие триботехнического состава в контакте «колесо–рельс» и его тип;

– усовершенствованная методика оценки 95%-го ресурса бандажей колесных пар, основанная на использовании полиномиальной регрессии;

– разработанный комплекс рекомендаций по повышению эффективности применения триботехнических составов для обработки поверхности гребней бандажей колесных пар электровозов.

**Степень достоверности** полученных результатов подтверждается путем сопоставления результатов математического моделирования с результатами экспериментальных исследований. В ходе работы выполнено сопоставление результатов динамических испытаний реального электровоза с результатами математического моделирования. Расхождение динамических характеристик разработанной математической модели и реального электровоза составляет 3–8 %. Результаты прогнозирования ресурса бандажей, полученные при математическом моделировании и экспериментальном исследовании, отличаются на 5–9 %. Достоверность результатов подтверждается применением современных методов и методик исследования, приборов и устройств измерений, современных компьютерных приложений, средств сбора и обработки данных.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований и практические предложения внедрены: на электровозах ВЛ11 всех индексов в ремонтном локомотивном депо Пермь (ТЧР-32), других предприятиях железнодорожного транспорта общего и необщего пользования. Результаты работы используются Свердловской дирекцией по ремонту тягового подвижного состава и Свердловской дирекцией тяги. Теоретические положения и результаты работы используются в учебном процессе по дисциплинам «Теория тяги поездов» и «Основы механики подвижного состава».

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на Межвузовской научной

конференции «Молодые ученые – транспорту» (Екатеринбург, УрГУПС, 2010 г.), Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава» (Омск, ОмГУПС, 2011 г.), Международной научно-технической конференции «Транспорт 21 века: Исследования. Инновации. Инфраструктура» (Екатеринбург, УрГУПС, 2011 г.), междисциплинарной молодежной научной конференции «Информационная школа молодого ученого» (Екатеринбург, УрО РАН, 2012–2013 гг.), семинаре аспирантов УрГУПС (2012 г.), заседаниях кафедры «Электрическая тяга» УрГУПС (2010–2014 гг.)

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 16 печатных работах, в том числе 7 статей опубликованы в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций».

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Основное содержание работы изложено на 133 страницах машинописного текста, включает 26 таблиц, 44 рисунка, список литературы содержит 141 наименование.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, положения научной новизны и практической ценности работы.

**В первой главе** приведены результаты анализа неисправностей бандажей колесных пар, выявленные при проведении плановых и внеплановых ремонтов электровозов ВЛ11. Согласно проведенному анализу, половину от общего числа неисправностей составляет предельный параметрический износ гребня бандажа по толщине. Следовательно, снижение изнашивания гребней бандажей является наиболее эффективным способом увеличения ресурса колесных пар и, как следствие, межремонтных пробегов электровозов. С учетом поставленной цели и задач диссертационного исследования составлена структурная схема, приведенная на рисунке 1.





Рисунок 1 – Структурная схема исследования

Произведен анализ факторов, влияющих на изнашивание гребней бандажей. Интенсивность изнашивания в наибольшей степени определяется площадью взаимодействия поверхностей колеса с рельсом и максимальным контактным давлением. В качестве перспективного способа повышения ресурса рассмотрено применение триботехнических составов – группы материалов, представляющих собой сухую смесь частиц минералов, содержащую до 75 % серпентина. При попадании состава в узел трения происходит образование покрытия, подобного керамическому, что изменяет характер распределения нагрузки по контактной площадке, при этом снижается максимальное контактное давление и уменьшается интенсивность изнашивания. Произведен анализ процесса образования покрытия. Влияние условий в контакте на эффективность метода показано на рисунке 2.





Рисунок 2 – Блок-схема процесса формирования покрытия

На основании приведенной блок-схемы сделан вывод о том, что используемые триботехнические составы имеют узкий спектр применения. При этом в контакте «колесо–рельс» обеспечиваются все условия, необходимые для протекания процесса, а трибо-система «колесная пара–рельс» является незамкнутой, что исключает возникновение отрицательного эффекта за счет изнашивания поверхностей колеса и

рельса частицами абразива, полученного при деградации исходного состава.

Во второй главе представлена разработанная комплексная математическая модель изнашивания бандажей колесных пар электровоза ВЛ11К, состоящая из двух модулей. Блок-схема модели приведена на рисунке 3.

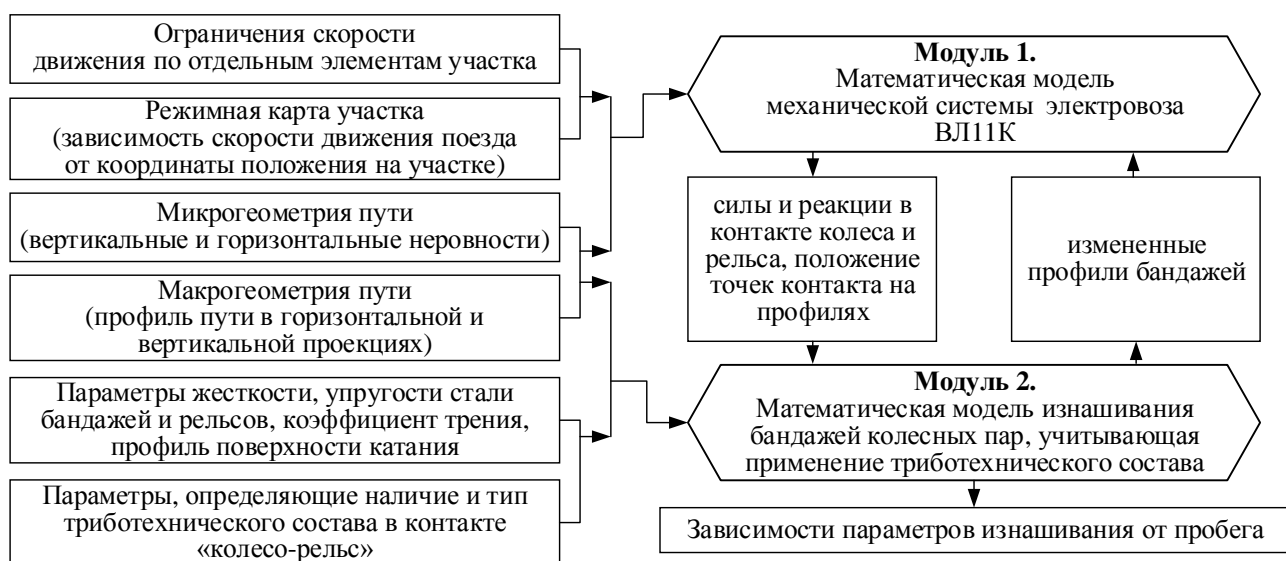


Рисунок 3 – Блок-схема комплексной модели изнашивания бандажей

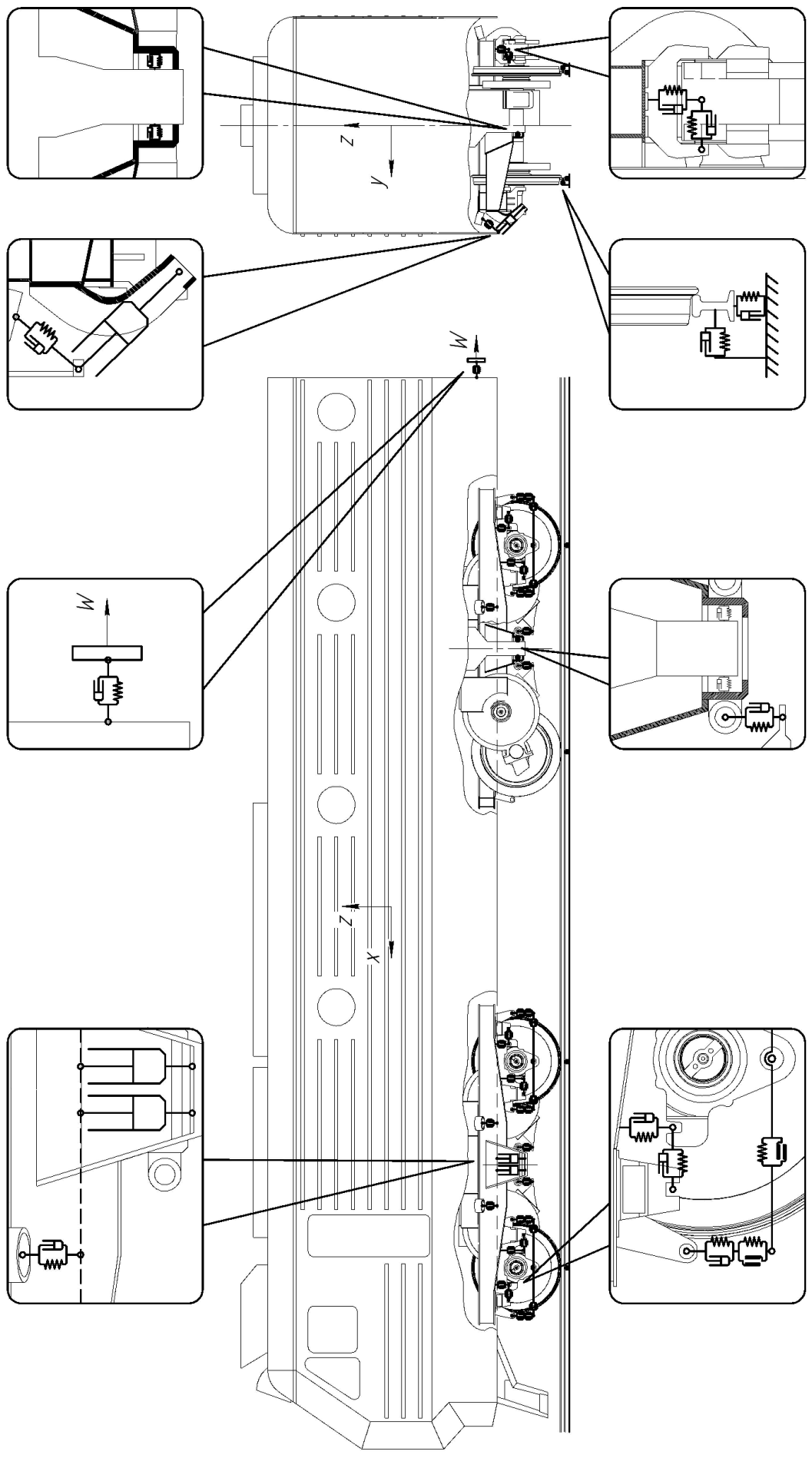


Рисунок 4 – Силовые связи в модели механической части электровоза ВЛ11К

Формирование модели выполнено в виде аналитически заданного вычислительного блока на базе Mathcad и в среде программного комплекса моделирования механических систем «Универсальный механизм». Расчетная схема модели состоит из 23 тел, связанных с помощью идеальных шарниров или шарниров с заданными силами, а также линейных и нелинейных силовых элементов (рисунок 4). Учитываются реакции со стороны пути и нелинейные составляющие в рессорном подвешивании. При анализе модели используется общая геометрическая методика без предположения о малых углах поворота. Модель механической системы секции электровоза ВЛ11К имеет 54 степени свободы.

При моделировании процесса изнашивания бандажей колесных пар геометрический профиль поверхности катания задан с помощью аппроксимирующей функции, определенной на отрезке значений  $[y_6 \min; y_6 \max]$  и имеющей вид

$$z_6(y_6) = \frac{a + by_6 + cy_6^2 + dy_6^3}{1 + ey_6 + fy_6^2 + gy_6^3}, \quad (1)$$

где  $a, b, c, d, e, f, g$  – коэффициенты, определяемые при аппроксимации.

При моделировании процесса изнашивания исходный профиль (кривая 1 на рисунке 5) разбивается на  $N$  участков, имеющих равную длину по оси  $y_6$  системы координат бандажа. Через средние точки каждого участка строятся частные системы координат по нормали к поверхности катания. Координаты точек на осях  $z_1, \dots, z_N$  фиксируются в полной системе координат бандажа. При изнашивании бандажа производится смещение точки  $i$ -й частной системы в положительном направлении оси  $z_i$ . После определенного числа итераций процесса моделирования происходит расчет нарастания износа по осям  $z_1, \dots, z_N$  и построение изношенного профиля путем аппроксимации (кривая 2 на рисунке 5).

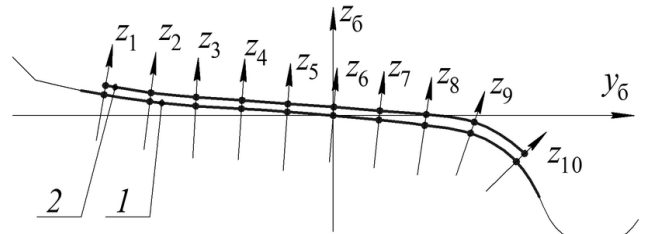


Рисунок 5 – Построение профилей бандажа при моделировании

Для перевода объемного износа в функцию изменения профиля бандажа интегрируется значение параметра объемного износа  $I_v$  по длине  $i$ -го отрезка на профиле катания

$$z_i = \iint_{\delta_i S} I_v dS d\delta. \quad (2)$$

где  $\delta_i$  – поперечная длина  $i$ -го отрезка на профиле;  $S$  – пройденный путь.

Значение объемного износа зависит от значения крипа колеса и максимального контактного давления  $P_{N \max}$

$$I_V = k_V \sqrt{\frac{v_{\text{кx}}^2 + v_{\text{кy}}^2}{v_{\text{дв}}^2}} \cdot P_{N \max}, \quad (3)$$

где  $k_V$  – коэффициент объемного износа;  $P_{N \max}$  – максимальное контактное давление;  $v_{\text{кx}}$ ,  $v_{\text{кy}}$  – скорости продольного и поперечного проскальзывания колеса по рельсу;  $v_{\text{дв}}$  – касательная скорость движения колеса.

$$P_{N \max} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot N \cdot K_{\text{пт}}^2}{2 \cdot \pi^3 \cdot r_3^2}}, \quad (4)$$

где  $N$  – нормальная сила в контакте «колесо–рельс»;  $r_3$  – эквивалентный радиус контактирующих поверхностей;  $K_{\text{пт}}$  – коэффициент, учитывающий свойства пары трения.

Этот коэффициент определяет характеристики процесса упругой деформации на поверхностях бандажа и рельса при их контакте.

$$K_{\text{пт}} = \frac{E}{1 - \nu^2}, \quad (5)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\nu$  – коэффициент Пуассона исследуемых материалов.

Введение коэффициента  $K_{\text{пт}}$  делает возможным проведение лабораторных исследований на машине трения для определения действия триботехнического состава на изнашивание поверхностей. Полученные экспериментальным путем значения приведены в таблице 1 и использованы в математической модели. Установлено, что применение триботехнических составов снижает максимальное давление в контакте для состава НИОД-2 в 1,06 раза и в 1,28 раза – для состава НИОД-5.

Таблица 1 – Результаты исследований свойств материалов

Материал образца	$E$ , МПа	$\nu$	$K_{\text{пт}}$ , Н/м <sup>2</sup>
Бандажная сталь (марка 2)	$2,10 \cdot 10^5$	0,280	$2,28 \cdot 10^{11}$
Бандажная сталь (марка 2) + покрытие НИОД-2	$2,04 \cdot 10^5$	0,241	$2,17 \cdot 10^{11}$
Бандажная сталь (марка 2) + покрытие НИОД-5	$1,45 \cdot 10^5$	0,223	$1,53 \cdot 10^{11}$

Выполнено три последовательных процесса моделирования следующих ситуаций: необработанных бандажей, а также бандажей с покрытием, образованным триботехническими составами НИОД-2 и НИОД-5. Использован профиль ДМетИ (ЛР) для бандажей электровоза и профиль для рельсов Р65. Для каждой ситуации движения использованы профили макрогеометрии исследуемого участка, описы-

вающие длину каждого элемента, значения уклонов и кривых. Учтены весовые нормативы для грузовых поездов. В результате моделирования получены следующие значения ресурса: при отсутствии обработки триботехническим составом – 96,786 тыс. км; при использовании триботехнического состава НИОД-2 – 116,625 тыс. км; при обработке триботехническим составом НИОД-5 – 143,089 тыс. км.

**В третьей главе** приведены результаты выполненных исследований по совершенствованию методики прогнозирования ресурса бандажей колесных пар электровозов и оценки эффективности применения триботехнических составов.

Измерение контролируемых параметров бандажей колесных пар проводилось с помощью комплексного измерителя параметров КИП-03. Согласно паспорту прибора, относительная погрешность при измерении параметров толщины гребня и проката бандажей составляет не более 5 %, что меньше аналогичных показателей универсального шаблона УТ-1М (10 %).

Процесс изнашивания бандажей колесных пар электровозов с высокой степенью точности описывается нормальным законом распределения, что было подтверждено путем проверки гипотезы выполнения неравенства расчетного и критического значений критерия Пирсона  $\chi^2_i < \chi^2_{кр}$ .

При использовании линейной аппроксимации для прогнозирования ресурса бандажей не учитывается техническое состояние пути и локомотива, режим ведения поезда и другие факторы. Их действие приводит к увеличению времени приработки и раннему наступлению периода усиленного изнашивания. Указанных недостатков лишена модель, основанная на полиномиальной функции (рисунок 6).

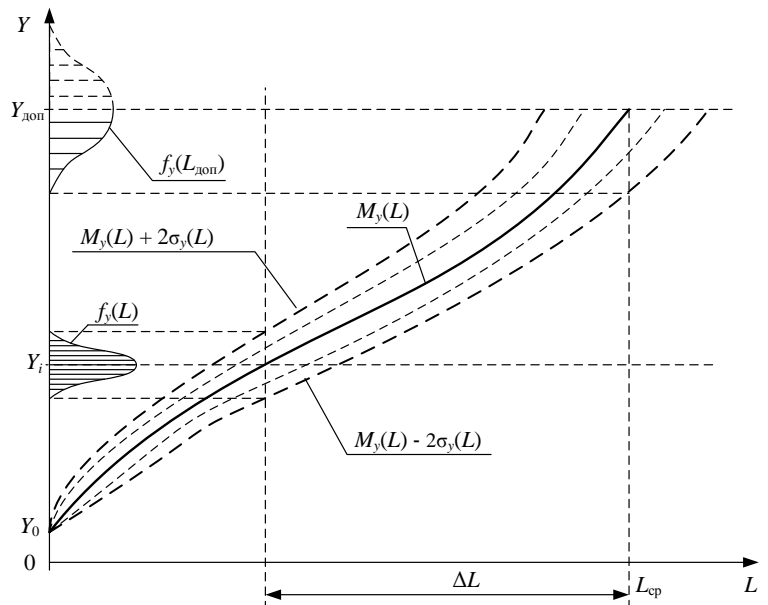


Рисунок 6 – Схема формирования параметрического отказа

При этом зависимости математического ожидания  $M_y(L)$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma_y(L)$  от пробега аппроксимируются в виде полиномов, точность аппроксимации зависит от их степени.

Поэтому были определены степени полиномов зависимостей  $M_y(L)$  и  $\sigma_y(L)$ , при которых точность регрессионного анализа будет наибольшей. Критерий оптимальности полинома степени  $N$  зависит от трех факторов

$$opt(N) = f(R_{yN}; F_{yN}; \delta_{yN}), \quad (6)$$

где  $R_{yN}$  – коэффициент корреляции полинома по данным исходной выборки;  $F_{yN}$  – критерий Фишера, определяющий отношение дисперсий линейной функции и полиномиальной зависимости;  $\delta_{yN}$  – параметр соответствия условию монотонного возрастания на исследуемом интервале.

Для аппроксимации зависимости среднего значения от пробега оптимальным будет использование полинома третьей степени, для зависимости средне-квадратического отклонения – полинома первой степени.

Для проверки адекватности полученных уравнений регрессии использован критерий Фишера (сравнение дисперсий линейной и полиномиальной регрессии). Уменьшение значения дисперсии характеризует предлагаемую методику для определения предельного ресурса бандажей колесных пар как более точную.

Значение вероятности отказа напрямую связано с точностью статистического метода. С учетом относительной погрешности измерительного прибора КИП-03 ( $\pm 5\%$ ), не требуется добиваться точности регрессионного анализа более 95%. Для границ доверительного интервала выбраны значения  $M_{yi} - 2 \cdot \sigma_{yi}$ ;  $M_{yi} + 2 \cdot \sigma_{yi}$ . Использование предложенной методики позволит уменьшить число ремонтов электровозов в результате отказов бандажей до достижения прогнозируемого ресурса, тем самым снизить вероятность отказа в эксплуатации, уменьшить количество обточек и замен колесных пар.

Статистический анализ по предложенной методике произведен для электровозов ВЛ11, приписанных к ремонтным локомотивным депо Свердловской дирекции по ремонту тягового подвижного состава. Результаты регрессионного анализа приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Уравнения регрессии и характеристики зависимости параметра уменьшения толщины гребня бандажей колесных пар

Зависимость	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции, $r_{yL}$	Остаточная дисперсия, $S_0^2$ , мм <sup>2</sup>	95 %-й ресурс, тыс. км
Группа 1 – бандажи не обработаны триботехническими составами				
$M_y(L)$	$0,027 + 0,038 \cdot L - 1,203 \cdot 10^{-4} \cdot L^2 + 1,266 \cdot 10^{-6} \cdot L^3$	0,998	0,002	91,602
$\sigma_y(L)$	$0,280 + 7,448 \cdot 10^{-3} \cdot L$	0,743	0,025	
Группа 2 – бандажи обработаны составом НИОД-2 (все измерения)				
$M_y(L)$	$0,074 + 0,029 \cdot L - 4,787 \cdot 10^{-4} \cdot L^2 + 5,097 \cdot 10^{-6} \cdot L^3$	0,980	0,008	95,421
$\sigma_y(L)$	$0,104 + 9,733 \cdot 10^{-3} \cdot L$	0,947	0,005	
Группа 2а – бандажи обработаны составом НИОД-2 (получен эффект)				
$M_y(L)$	$0,076 + 0,021 \cdot L - 2,338 \cdot 10^{-4} \cdot L^2 + 2,782 \cdot 10^{-6} \cdot L^3$	0,975	0,011	109,192
$\sigma_y(L)$	$0,116 + 8,774 \cdot 10^{-3} \cdot L$	0,958	0,004	
Группа 3 – бандажи обработаны составом НИОД-5 (все измерения)				
$M_y(L)$	$0,074 + 0,029 \cdot L - 4,787 \cdot 10^{-4} \cdot L^2 + 5,097 \cdot 10^{-6} \cdot L^3$	0,980	0,008	100,003
$\sigma_y(L)$	$0,104 + 9,733 \cdot 10^{-3} \cdot L$	0,947	0,005	
Группа 3а – бандажи обработаны составом НИОД-5 (получен эффект)				
$M_y(L)$	$0,068 + 0,022 \cdot L - 2,642 \cdot 10^{-4} \cdot L^2 + 2,382 \cdot 10^{-6} \cdot L^3$	0,979	0,006	126,031
$\sigma_y(L)$	$0,096 + 6,963 \cdot 10^{-3} \cdot L$	0,958	0,002	

Для исследования выбраны электровозы, прошедшие текущий ремонт ТР-3 с заменой бандажей колесных пар. В качестве первой контрольной группы выбраны 15 электровозов, бандажи которых не обрабатывались триботехническими составами. Вторая и третья контрольные группы включали в себя по 15 электровозов, бандажи которых были обработаны триботехническими составами НИОД-2 и НИОД-5 соответственно. Сбор данных для статистического анализа проводился в течение 6 месяцев. В ходе анализа установлено, что образование покрытия на поверхности бандажа наблюдается у 6 из 15 электровозов контрольной группы 1 и у 7 из 15 электровозов группы 2. Электровозы с полностью сформированным покрытием из контрольных групп 2 и 3 выделены в группы 2а и 3а соответственно. Дальнейшее сравнение проведено для групп 1, 2а и 3а.

Статистический анализ данных замеров контролируемых параметров бандажей показал, что применение триботехнических составов для обработки колесных пар электровозов ВЛ11 позволяет увеличить ресурс бандажей в 1,19 раза при



использовании состава НИОД-2, в 1,38 раза при обработке составом НИОД-5.

**В четвертой главе** представлен сравнительный анализ результатов, полученных во второй и третьей главах работы. Разница между результатами математического моделирования и данных эксперимента находится в пределах 4–8 %.

При анализе действий машиниста и выполнения контрольных поездок установлено, что нарушение процесса образования керамического покрытия на поверхности происходит путем его изнашивания на этапе формирования при торможении гребневыми колодками. В процессе кристаллизации покрытие уязвимо к фрикционному износу, что подтверждается испытаниями образцов на машине трения по схеме «диск–колодка».

Предлагается изменить внутренний профиль тормозной колодки для уменьшения гребневого контакта в течение 100 км пробега после установки устройств для нанесения состава. После указанного пробега контакт будет производиться по исходной поверхности колодки. Внешний вид предлагаемого профиля гребневой тормозной колодки приведен на рисунке 7.

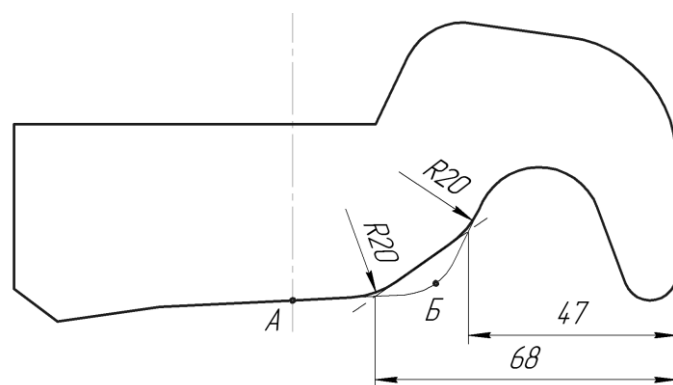


Рисунок 7 – Предлагаемый профиль тормозной колодки

Исследование нагревания пары трения «колодка–бандаж» для исходного и предлагаемого профилей рабочей поверхности колодки проводились с использованием метода конечных элементов. Рассмотрен нестационарный процесс торможения поезда весом 6200 т на спуске 10 ‰ с применением экстренного торможения. При моделировании рассчитывалась температура в двух точках на поверхности бандажа: точке *A* на пересечении поверхности катания и поперечной оси бандажа, точке *B* на гребне (рисунок 7). При использовании исходной колодки получены максимальные значения температуры для точек:  $T_{1A \max} = 234,85 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $t = 56,4 \text{ с}$ ;  $T_{1B \max} = 274,71 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $t = 52,0 \text{ с}$ . При моделировании второй ситуации выявлено незначительное повышение температуры на поверхности катания ( $T_{2A \max} = 249,31 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $t = 51,7 \text{ с}$ ), температура на гребне не превысила  $T_{2B \max} = 153,6 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $t = 80,5 \text{ с}$ . Графические зависимости температуры  $T$  от времени моделирования в точках *A* и *B* для колодок с исходным и предлагаемым профилями показаны на рисунке 8.

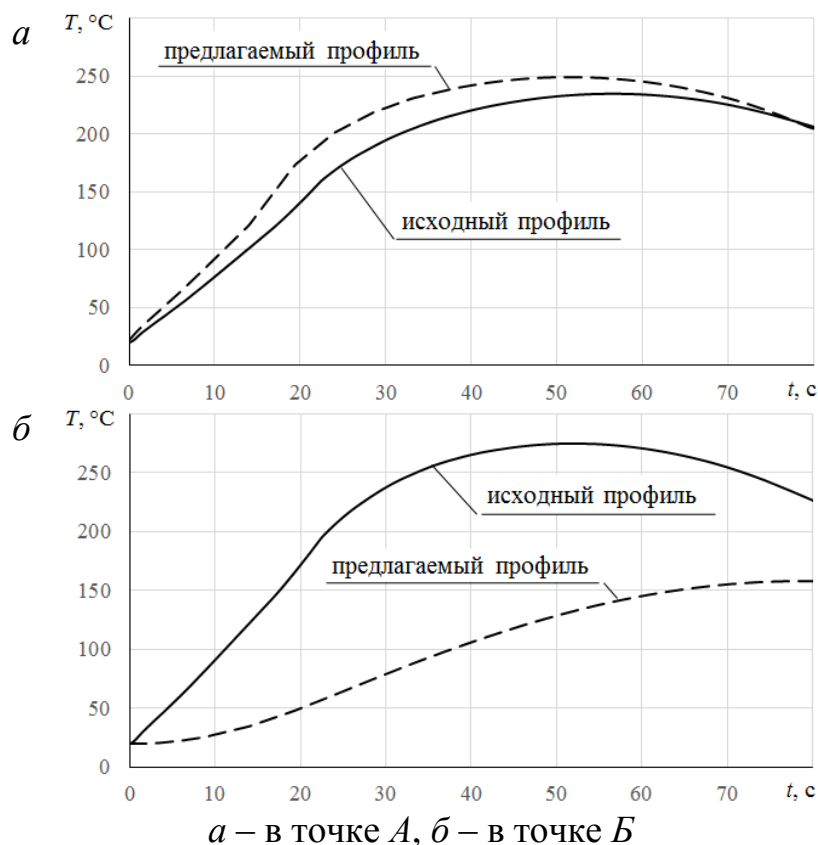


Рисунок 8 – Графики зависимости температуры поверхности от времени при торможении

ническим составом, производится при постановке электровоза на первый текущий ремонт ТР-1 после проведения ремонта ТР-3 с заменой бандажей. При установке устройства контролируется угол между поверхностью бандажа и осью стержня, а также расстояние между торцевой поверхностью корпуса кронштейна и поверхностью катания, которое не должно превышать 20 мм. Параллельно производится замена стандартных тормозных колодок на колодки с предложенным профилем. Выполняются отметки об установке стержней с триботехническим составом в книге записи ремонта локомотивов формы ТУ-28 и в журнале технического состояния локомотива формы ТУ-152. При прохождении последующих технических обслуживаний ТО-2 помимо регламентированных операций производится осмотр устройств для нанесения покрытий, проверка наличия стержней с триботехническим составом. При выработке стержнем полного ресурса устройства демонтируются. Описанный метод повышения эффективности обработки триботехническими составами применим для всех электровозов, на которых используются гребневые тормозные колодки.

Применение тормозной колодки с предлагаемым профилем поверхности трения позволит снизить температуру гребня при торможении в 1,8 раза. При температуре ниже 180 °С процесс кристаллизации покрытия проходит с сохранением свойств материала. Кроме этого, отсутствует абразивный износ покрытия при его формировании.

Монтаж устройств для нанесения покрытия, содержащих стержни с триботехническим составом,

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получено следующее.

1. На основе выполненного анализа данных отказов бандажей колесных пар на плановых и неплановых ремонтах электровозов серии ВЛ11 всех индексов установлено, что в 50–55 % случаев причиной отказа является предельный износ гребня бандажа.

2. Обработка гребней бандажей триботехническими составами является наиболее простым с технологической точки зрения и эффективным методом повышения ресурса колесных пар электровозов. В результате обработки на поверхности гребня бандажа образуется упрочненный керамический слой толщиной 50–100 мкм. Сформированное покрытие не влияет на свойства основного металла или третьего тела, при этом изменяется характер распределения усилий по поверхности контакта, уменьшается значение нормального давления.

3. Разработана комплексная математическая модель, которая позволяет учитывать изменения параметров жесткости и упругости при прогнозировании ресурса бандажей. При верификации модель показала расхождение расчетных динамических характеристик с реальными значениями на электровозе в пределах 3–8 %. Для расчета максимальных напряжений в контакте «колесо–рельс» предложено использовать коэффициент свойств пары трения. В результате лабораторных исследований на машине трения установлено, что снижение расчетного значения контактного давления при использовании состава НИОД-2 достигает 1,06 раза, для состава НИОД-5 получено снижение в 1,28 раза.

4. Усовершенствована методика определения ресурса бандажей колесных пар. Применение полиномиальной функции в качестве аппроксимирующей зависимости контролируемых параметров от пробега электровоза позволит значительно повысить точность прогнозирования ресурса бандажей колесных пар. Решена задача выбора степени полинома. Для зависимости среднего значения оптимальной будет аппроксимация полиномом третьей степени, для зависимости среднеквадратического отклонения – полиномом первой степени (линейной функцией). Внедрение в локомотивных депо предложенной методики определения 95%-го ресурса позволит снизить вероятность преждевременного отказа бандажей в эксплуатации и оптимизировать проведение обточек и ремонтов колес-

ных пар электровозов.

5. В результате моделирования процесса изнашивания бандажей колесных пар установлено, что применение триботехнического состава НИОД-2 позволяет увеличить ресурс бандажей колесных пар в 1,21 раза. Для триботехнического состава НИОД-5 увеличение ресурса составляет 1,48 раза.

6. Статистический анализ данных замеров контролируемых параметров бандажей показал, что применение триботехнических составов для обработки колесных пар электровозов ВЛ11 позволяет увеличить ресурс бандажей в 1,19 раза при использовании состава НИОД-2, в 1,38 раза при обработке составом НИОД-5. Разница между результатами математического моделирования и данных эксперимента составляет в зависимости от ситуации 4–8 %.

7. Предложенный метод повышения эффективности обработки триботехническим составом предполагает изменение профиля тормозной колодки и при выполнении указанной последовательности действий позволит достичь максимальной эффективности при обработке бандажей триботехническим составом.

8. Результаты исследований внедрены на электровозах ВЛ11 в ремонтном локомотивном депо Пермь (ТЧР-32), других локомотивах на предприятиях железнодорожного транспорта общего и необщего пользования. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения обработки гребней бандажей колесных пар триботехническими составами на одну секцию электровоза составил 17 тыс. руб. при сроке окупаемости 2 года 8 месяцев.

Основные положения диссертации опубликованы в изданиях, **включенных в перечень ВАК при Минобрнауки России:**

1. Тихонов, В. А. Разработка автоматизированного рабочего места мониторинга параметров колесных пар локомотивов / А. П. Буйносов, В. А. Тихонов / Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 1. – С. 43–46.

2. Тихонов, В. А. Результаты применения триботехнического состава для уменьшения износа гребней колесных пар электроподвижного состава / А. П. Буйносов, В. А. Тихонов // Вестник ВЭЛНИИ. – Новочеркасск, 2011. – № 2(62). – С. 114–125.

3. Тихонов, В. А. Определение предельно допустимой разности диаметров бандажей колесных пар тягового подвижного состава методом кусочно-линейной аппроксимации / А. П. Буйносов, В. А. Тихонов // Омский научный вестник. Се-

рия Приборы, машины и технологии. – 2011. – № 3(103). – С. 148–151.

4. Тихонов, В. А. Новый гребнесмазыватель твердого типа / А. П. Буйносов, В. А. Тихонов // Железнодорожный транспорт. – М., 2011. – № 10. – С. 54–55.

5. Тихонов, В. А. Методика определения ресурса бандажей колесных пар локомотивов / А. П. Буйносов, И. М. Пышный, В. А. Тихонов // Транспорт Урала. – 2012. – № 3. – С. 98–102.

6. Тихонов, В. А. Модель эксплуатационного износа сложной технической системы / А. П. Буйносов, И. М. Пышный, В. А. Тихонов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 1(297). – С. 52–57.

7. Тихонов, В. А. Применение триботехнического состава для уменьшения интенсивности износа гребней колесных пар электроподвижного состава / А. П. Буйносов, В. А. Тихонов // Технология машиностроения. – 2014. – №4. – С. 47–52.

*Личный вклад автора* в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1] – постановка задачи, анализ применяемых в настоящее время методов повышения ресурса бандажей; [2] – исследование физических свойств керамического покрытия; [3, 4] – реализация универсального алгоритма обработки экспериментальных данных; [5] – формирование критериев выбора порядка полинома; [6] – формирование аналитических уравнений при моделировании; [7] – исследование эффективности способа обработки гребней бандажей триботехническими составами.

Тихонов Виктор Артурович

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ БАНДАЖЕЙ  
КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОВОЗОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ  
Триботехнических составов**

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

---

Подписано к печати

Формат 60×84 1/16

Тираж 100 экз.

Объем усл. печ. л. 1,0

Заказ №

---

Издательство УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 6б