

ISSN 1818-5509

РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

ТРУДЫ
РОСТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

Научно-технический журнал

№ 4 (73)
2025

Ростов-на-Дону

ТРУДЫ
Ростовского государственного университета
путей сообщения

2025
№ 4 (73)

Научный журнал.
Регистрационный номер
ПИ № ФС77-79264 от 16 октября 2020 г.
Федеральной службы по надзору
в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Издается с ноября 2005 г.

Учредитель
Ростовский государственный университет путей сообщения

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор журнала

Владимир Иванович Колесников, академик Российской академии наук,
доктор технических наук, профессор, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Владимир Дмитриевич Верескун, д-р техн. наук, профессор, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Александр Николаевич Гуда, д-р техн. наук, профессор, заместитель главного редактора,
РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Виктор Федорович Асминин, д-р техн. наук, профессор, ВГЛТУ, г. Воронеж

Олег Андреевич Ворон, д-р техн. наук, доцент, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Артем Евгеньевич Литвинов, д-р техн. наук, доцент, КубГТУ, г. Краснодар

Николай Николаевич Новиков, д-р техн. наук, профессор, НАЦИОТ, г. Москва

Александр Дмитриевич Петрушин, д-р техн. наук, профессор, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Рустам Вячеславович Рахимов, д-р техн. наук, профессор, ТГТУ, г. Ташкент

Владимир Александрович Соломин, д-р техн. наук, профессор, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Виктор Анатольевич Финоченко, д-р техн. наук, профессор, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Татьяна Анатольевна Финоченко, канд. техн. наук, доцент, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Александр Николаевич Чукарин, д-р техн. наук, профессор, ДГТУ, г. Ростов-на-Дону

Александр Евгеньевич Шаишурин, д-р техн. наук, профессор, БГТУ «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

Иван Анатольевич Яицков, д-р техн. наук, профессор, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Ангелина Олеговна Куделина (ответственный секретарь)

**Trudy
Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobseniya
Scientific Journal**

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

V. I. Kolesnikov, Academician of Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

V. D. Vereskun, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

A. N. Guda, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don (deputy editor-in-chief)

V. F. Asminin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, VSUFT, Voronezh

O. A. Voron, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, RSTU, Rostov-on-Don

A. E. Litvinov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, KubSTU, Krasnodar

N. N. Novikov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, NAOSC, Moscow

A. D. Petrushin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

R. V. Rakhimov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, TSTU, Tashkent

V. A. Solomin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

V. A. Finochenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

T. A. Finochenko, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, RSTU, Rostov-on-Don

A. N. Chukarin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, DSTU, Rostov-on-Don

A. E. Shashurin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, D. F. Ustinov BSTU «VOENMEH», Saint Petersburg

I. A. Yaitskov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

A. O. Kudelina, executive secretary, RSTU, Rostov-on-Don

СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА

Бакико Е. В. Анализ влияния компетентности профильных специалистов на показатели эффективности системы управления охраной труда	8
Баланов И. А., Баланова М. В., Горин М. А. Снижение рисков при эксплуатации грузоподъемных машин и механизмов на железнодорожном транспорте	14
Денисова Ю. А., Рудилов Д. А. Системный подход к управлению профессиональными рисками на железнодорожном транспорте на основе когнитивно-профилирующей модели	19
Завьялов А. Б., Мешкова Е. А., Глухих Т. В. Инновационные технологии обеспечения пожарной безопасности на подвижном составе железнодорожного транспорта	26
Зонова Н. О. Проблемы учета человеческого фактора при количественной оценке рисков воздействия опасностей на производстве	35
Каменская Е. Н. Защита человека от коммуникационных угроз	42
Каменская Е. Н., Дедюлина Н. К. Контентные угрозы информационно-психологической безопасности человека	47
Крутова В. А., Фролова Д. С. Верификация результатов измерений шума в системе помещений вагона-электростанции восстановительного поезда	53
Набоков А. Е., Коробов С. М., Финоченко Т. А. Фоновый акустический шум производственного помещения	60
Нестерук В. Н., Рудилов Д. А. Методы снижения влияния человеческого фактора на безопасность труда на железнодорожном транспорте	67
Омельченко Д. А., Фирсов В. А. Рекомендации по улучшению условий труда на предприятии «РОСТСЕЛЬМАШ»	72

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ,
ТЯГА ПОЕЗДОВ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ

Валенцева Е. В., Шапшал С. А., Шапшал А. С. Практическая реализация расчета стоимости жизненного цикла тягового подвижного состава и использование его в целях оптимизации расходов	77
Ваулин В. А., Муратов А. В. Бесконтактная тепловизионная диагностика дизельных двигателей тепловозов	84
Веригин О. С., Зарифьян А. А. Перспективные направления исследований динамики колесно-моторных блоков магистральных электровозов применительно к увеличению продолжительности жизненного цикла	91
Кириллов А. В., Чучин А. А. Анализ методов математического моделирования пневматических процессов при торможении в грузовых поездах	97
Ковалёва И. Н., Пигунов А. В., Панов А. Н., Ромашова Е. Ю., Сычев А. П., Шубитидзе В. В., Подгорная Ю. С. Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава. Риск-ориентированный подход	102
Коржов С. Н., Поляков П. А. Повышение эффективности торможения путем усовершенствования конструкции клещевого механизма тормозного устройства	111
Маклаков С. Ф., Мишин В. А. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкции при посадке с натягом с помощью ANSYS	120

Никулин К. А., Шепелин П. В. Современные тенденции развития ремонта тяговых электродвигателей	129
Пляскин А. К., Потапов А. А. Показатели надёжности как критерий постановки локомотива под поезд	137
Поляков П. А., Светличный В. В., Мизюкаев А. В. Пути повышения эффективности работы узла охлаждения дисково-колодочных тормозов	147
Романенко Ю. Ю., Булыгин Ю.И., Финоченко Т. А. Особенности моделей радиационного теплопереноса.....	154
Тычков А. С., Чемоданов Д. А., Строганова А. А. Основные направления применения цифровых инструментов для технического содержания электроподвижного состава	162
Шахназарян Р. А., Муратов А. В. Анализ мировой и российской практик использования альтернативных видов топлива на железнодорожном транспорте	167
Шрайбер М. А., Иванов В. Н., Ягудин Д. А. Конечно-элементная модель старения изоляции тяговых электродвигателей локомотивов	172
Юдин И. С., Часовников Р. Р., Копотун К. Б., Лагунова Е. О., Костин Д. С. Современные российские металлопорошковые дефектоскопы серии «ЕРМАГ»	179
Лохматов А. А. Состояние ремонтной базы специального самоходного подвижного состава на восточном полигоне ОАО «РЖД» : системные противоречия и направления развития.....	186
Черномазов А. В. Автоматизированная система расчета допустимых межпоездных интервалов электрифицированного участка Белореченская – Туапсе на основе использования систем накопления электроэнергии.....	197

CONTENTS

LABOUR SAFETY

Bakiko E. V. Analysis of the Impact of Specialist Competence on the Performance Indicators of an Occupational Health and Safety Management System	8
Balanova I. A., Balanova M. V., Gorin M. A. Occupational Safety When Working with Lifting Mechanisms in Railway Transport	14
Denisova Yu. A., Rudikov D. A. A Systems Approach to Managing Professional Risks in Railway Transport Based on a Cognitive-Profiling Model	19
Zavyalov A. B., Meshkova E. A., Glukhikh T. V. Innovative Technologies for Ensuring Fire Safety on Rolling Stock of Railway Transport	26
Zonova N. O. Problems of Accounting for the Human Factor in the Quantitative Assessment of Risks of Hazard Exposure in Industry	35
Kamenskaya E. N. Protection of Individuals from Communication Threats	42
Kamenskaya E. N., Dedyulina N. K. Content Threats to Information and Psychological Security of the Individual	47
Krutova V. A., Frolova D. S. Verification of Noise Measurement Results in the System of the Recovery Train's Car-Electric Station	53
Nabokov A. E., Korobov S. M., Finochenko T. A.	60
Nesteruk V. N., Rudikov D. A. Methods for Reducing the Impact of the Human Factor on Occupational Safety in Rail Transport	67
Omelchenko D. A., Firsov V. A. Recommendations for Improving Working Conditions at the ROSTSELMASH Enterprise	72

RAILWAY ROLLING STOCK, TRAIN TRACTION AND ELECTRIFICATION

Valentseva E. V., Shapshal S. A., Shapshal A. S. Practical Implementation of Calculation of the Life Cycle Cost of Traction Rolling Stock and its Use for the Purposes of Cost	77
Vaulin V. A., Muratov A. V. Non-Contact Thermal Imaging Diagnostics of Diesel Engines of Locomotives	84
Verigin O. S., Zarifyan A. A. Promising Areas of Research on the Dynamics of Wheel-Motor Blocks of Main Electric Locomotives in Relation to Increasing the Life Cycle	91
Kirillov A. V., Chuchin A. A. Analysis of Mathematical Modeling Methods for Pneumatic Processes during Braking in Freight Trains	97
Kavaliyova I. N., Pygunov A. V., Panov A. N., Romatova E. Yu., Sychev A. P., Shubitidze V. V., Podgornaya Yu. S. Prospects for the Development of Locomotive, Train and Vehicle Maintenance Technology. Risk-Based Approach	102
Korzhov S. N., Polyakov P. A. Improving Braking Efficiency by Upgrading the Design of the Clamping Mechanism of the Braking Device	111
Maklakov S. F., Mishin V. A. Stress-Strain Analysis of Structural Elements During Interference Fits Using Ansys	120
Nikulin K. A., Shepelin P. V. Modern Trends in the Development of Traction Electric Motor Repair	129
Plyaskin A. K., Potapov A. A. Reliability Indicators as Significant Criteria for Locomotive Assignment to a Train	137
Polyakov P. A., Svetlichny V. V., Mazyukaev A. V. Ways to Improve the Efficiency of the Disc Brake Cooling Unit	147

Romanenko Yu. Yu., Bulygin Yu. I., Finochenko T. A. Features of radiative heat transfer models.....	154
Tychkov A. S., Suitcase D. A., Stroganova A. A. The Main Directions of Application of Digital Tools for Technical Maintenance of Electric Rolling Stock	162
Shahnazaryan R. A., Muratov A. V. Analysis of Global and Russian Practices of Using Alternative Fuels in Railway Transport	167
Shrayber M. A., Ivanov V. N., Yagudin D. A. Finite Element Model of Aging of the Insulation of Locomotive Traction Electric Motors	172
Iudin I. S., Chasovnikov R. R., Kopotun E. A., Lagunova E. O., Kostin D. S. Modern Russian Metal Powder Flaw Detectors of the «ERMAG» Series	179
Lokhmatov A. A. The state of the maintenance facilities for special self-propelled rolling stock at the eastern test site of RZD: systemic contradictions and directions for development.....	186
Chernomazov A. V. Automated system for calculating permissible intertrain spaces on the electricified Belorechenskaya–Tuapse section based on the use of electricity storage systems.....	197

БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА

УДК 331.45

DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_8

*Е. В. Бакико***АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОМПЕТЕНТНОСТИ ПРОФИЛЬНЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОХРАНОЙ ТРУДА**

Аннотация. В работе ставится задача анализа влияния профессиональной компетентности специалистов по охране труда на показатели оценки эффективности и результативности системы управления охраной труда в организации.

На основе нормативных правовых актов РФ в сфере системного подхода к управлению охраной труда обозначены аспекты оценки эффективности и результативности деятельности в области охраны труда в организации.

С помощью таблицы сопряженности показана функциональная связь результатов деятельности специалистов по охране труда и изменения показателей эффективности и результативности системы управления охраной труда в аспектах ее оценки.

Экспертной оценкой выделены показатели эффективности системы управления охраной труда, которые подтверждают влияние уровня профессиональной компетентности специалистов по охране труда на изменение показателей эффективности и результативности деятельности в области охраны труда с организации как напрямую, так и опосредованно.

Ключевые слова: система управления охраной труда, показатели эффективности, специалист по охране труда, компетентность.

Для цитирования: Бакико, Е. В. Анализ влияния компетентности профильных специалистов на показатели эффективности системы управления охраной труда / Е. В. Бакико // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4 – С. 8–13. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_8.

Во всем мире большинство управленческих производственных процессов, в том числе управление охраной труда возможно лишь на системной основе [1]. Для построения и развития стратегии системы управления охраной (СУОТ) топ-менеджерам необходимы количественные показатели, с помощью которых можно оценивать ее эффективность и результативность в динамике. Также необходимы высококомпетентные профильные специалисты, спрос на которых по данным hh.ru вырос за последние 5 лет на 121%.

В России таким инструментом является государственный стандарт ГОСТ 12.0.230.0.3-2016, где для оценки СУОТ работодателям рекомендованы показатели эффективности и результативности деятельности в области охраны труда (ПРЭД) [2]. Он содержит два основных блока таких показателей: показатели результативности и эффективности управления (ПРЭУ) и показатели результативности и эффективности функционирования данной системы (ПРЭФ). Отдельные ПРЭФ и ПРЭУ связаны между собой, поскольку определенные действия, предпринимаемые руководством организации, оказывают существенное влияние на состояние условий и охраны труда в целом.

В зависимости от уровня культуры безопасности в организации большинство таких действий со стороны работодателем часто делегируются профильным специалистам –

специалистам по охране труда (менеджерам по безопасности), поскольку их функционал неразрывно связан с основными процессами СУОТ [3]. Анализ профессионального стандарта для таких специалистов показывает функциональную связь их квалификационных уровней и состояния развитости СУОТ [3].

Тогда гипотетически предположим наличие таких показателей ПРЭУ и/или ПРЭФ, на которые может как положительно, так и отрицательно влиять профессиональная компетентность специалистов по охране труда. Поэтому целью данной работы является выявление показателей оценки эффективности и результативности СУОТ в организации, связанных напрямую или опосредованно с уровнем профессиональной компетентности специалистов по охране труда (ПКСОТ).

В качестве метода научного исследования для проверки подобных гипотез можно использовать простой инструмент – таблицу сопряженности. Он используется в различных областях для анализа связи между двумя или более категориальными переменными, как в нашем случае между переменными ПРЭД и ПКСОТ (таблица 1).

Таблица 1

Таблица сопряженности показателей ПРЭУ и функциональных ожиданий результативности профессиональной деятельности специалистов по охране труда

Оценка результативности и эффективности СУОТ по ПРЭУ по аспектам		Оценка ПКСОТ по трудовым функциям (ТФ)	
пп. п. 5.8 ГОСТ 12.0.230.3-2016 [2]		пп. (код ТФ) профстандрта № 274н [3]	
1	внедрение политики в области охраны труда	3.1(А)	обеспечение функционирования системы управления охраной труда в организации
2	соблюдение требований законодательства	3.1.1	нормативное обеспечение безопасных условий и охраны труда
3	осуществление плановых мероприятий по управлению состоянием и охраной труда	3.2 (В)	планирование, разработка и совершенствование системы управления охраной труда и оценки профессиональных рисков
4	обучение в области охраны труда и системного управления охраной труда	3.1.2.	организация подготовки работников в области охраны труда
5	образование и профессиональная компетенция специалистов по охране труда	3.1, 3.2, 3.3, 3.4	соответствие для соответствующей функции образования, опыта, обучения, включая дополнительное обучение
6	обеспечение ресурсами и их эффективное использование	3.2.2	подготовка предложений по распределению полномочий, ответственности, обязанностей по вопросам управления охраной труда, оценки профессиональных рисков и обоснованию ресурсного обеспечения
7	регулирование затрат на обеспечение требований и управление охраной труда		
8	разработка новой и актуализация действующей документации по охране труда	3.3 (С)	экспертиза эффективности мероприятий, направленных на обеспечение функционирования системы управления охраной труда
9	своевременность и полнота корректирующих действий	3.4 (D)	стратегическое управление профессиональными рисками в организации

Из таблицы сопряжённости видно, что количественные показатели двух переменных, описываемые категориями, представленными в приведенных нормативных документах, имеют прямую и опосредованную связь.

Таким образом, повышая ПКСОТ можно напрямую улучшать 5-й аспект ПРЭУ (п. 5 табл. 1), а опосредованно во взаимодействии с другими участниками СУОТ 2-й, 3-й, 4-й, 8-й и 9-й аспекты. Однако, для оценки результативности такого повышения необходима методика оценки ПКСОТ.

Существующие авторские методические подходы для оценки ПКСОТ имеют различное назначение и могут оказывать влияние на разные аспекты ПРЭД. Например, методика оценки потенциальной ПКСОТ по входным параметрам учитывает лишь образование, опыт, обучение, наличие дополнительных профессиональных компетенций и характеристику мотивации работника, основанную на опроснике [4]. Такая оценка позволит фиксировать рост (при наличии такового) только 5-го аспекта ПРЭУ. Тогда как методика оценки, реализуемой ПКСОТ экспресс-диагностикой учитывает, как прямое, так и опосредованное влияние роста компетентности профильных специалистов на изменение показателей ПРЭУ [5].

Экспертной оценкой в таблице 2 обозначены три группы показателей ПРЭД (ПРЭУ и ПРЭФ) значения которых может зависеть от уровня ПКСОТ. Группа ПРЭД, выделенная полужирным начертанием шрифта – показатели, на которые уровень ПКСОТ имеет прямое влияние. На группу ПРЭД, выделенных *курсивным* начертанием шрифта, ПКСОТ имеет опосредованное влияние. В выделенных ячейках обозначены ПРЭД, имеющие общие данные для оценки как самих ПРЭД, так и оценки ПКСОТ методом экспресс-диагностики [5].

Таким образом по экспертным оценкам 8-и практикующих руководителей отделов охраны труда на различных предприятиях непосредственное влияние уровня ПКСОТ можно зафиксировать на 5-20% показателей ПРЭД (44 показателя из 214 представленных в приложение А табл. А1 и А2 ГОСТ 12.0.230.3-2016 [2]), а в том числе и опосредованное на 30% ПРЭД. Согласованность экспертов (коэффициент конкордации) $r = 0,43$.

При этом необходимо что такое значительное влияние уровня ПКСОТ на ПРЭД возможно при условии ряда принятых допущений:

- высокая заинтересованность высшего руководства компании в стратегии совершенствования системной работы в области охраны труда (обязательное условие);
- наличие полного функционала специалистов отдела охраны труда (не менее функционала приведенного в [2]);
- наличие вариативной части оплаты труда у всех участников СУОТ, особенно у специалистов отдела охраны труда, которая зависит от достижения ключевых плановых показателей СУОТ (материальное стимулирование реального снижения профессиональных рисков, а не формального);
- функционирование системы развития ПКСОТ на постоянной основе.

Кроме того, применение результатов проведенного анализа имеет также ряд ограничений:

- результаты не характерны для компаний, где СУОТ находится на стадии разработки или внедрения;
- влияние может быть не обнаружено в малочисленных компаниях, где нет штатных специалистов по охране труда;
- работа профильных специалистов в условиях постоянного дефицита времени, недостатка штатных единиц в отделе охраны труда и наличие расширенного функционала для специалистов по смежным направлениям в сфере техносферной безопасности;
- отсутствие экономической целесообразности внедрения системы материального стимулирования специалистов по охране труда, через оценку результативности и эффективности их деятельности ОТ по ключевым показателям эффективности (KPI) развития стратегии СУОТ в компании. Это сложно и дорого.

Таблица 2

Таблица сопряженности показателей ПРЕД и указаний влияния на них уровня ПКСОТ

Организ-я	Политика						п. А1 ¹		
	4.3			4.2			4.1		
	2	1	6	5	4	3	2	1	
	15	14	13	12	11	10	9	8	7

¹ Подраздел/пункт ПРЕД из первого столбца прил. А табл. А1 ГОСТ 12.0.230-2016 [2].

² Порядковый номер возможных показателей ПРЕД соответствующего элемента СУОТ (третий столбец соответствующего пункта первого столбца прил. А табл. А1 [2].

³ Здесь № – порядковый номер данных ПРЕД (первый столбец прил. А табл. А2 [2]) / N – количество показателей ПРЕД из второго столбца прил. А табл. А2 [2] / n – количество ПРЕД из числа N, связанных с уровнем ПКСОТ.

⁴ ПРЕД травматизма и профзаболеваемости раздела 2 прил. А табл. А2 [2].

⁵ ПРЕД условий труда раздела 3 прил. А табл. А2 [2].

⁶ ПРЕД обеспеченности работников средствами индивидуальной защиты раздела 4 прил. А табл. А2 [2].

⁷ ПРЕД санитарно-бытового обслуживания раздела 5 прил. А табл. А2 [2].

⁸ ПРЕД медицинского обслуживания 6 прил. А табл. А2 [2].

⁹ ПРЕД предоставления компенсаций за вредные условия труда раздела 7 прил. А табл. А2 [2].

¹⁰ ПРЕД обучения по охране труда раздела 8 прил. А табл. А2 [2].

¹¹ ПРЕД обеспечения технической безопасности производства раздела 9 прил. А табл. А2 [2].

¹² ПРЕД готовности к внештатным действиям раздела 10 прил. А табл. А2 [2].

Таким образом, оценка эффективности СУОТ в организации на по ряду показателей ПРЕД возможна через оценку эффективности деятельности профильных специалистов, поскольку уровень ПКСОТ влияет на значения ПРЕД СУОТ.

Список литературы

1. Приказ Минтруда России от 29.10.2021 № 776н «Об утверждении Примерного положения о системе управления охраной труда» URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_403335/ (дата обращения 10.11.2025).
2. ГОСТ 12.0.230.0.3-2016 «Межгосударственный стандарт. Система

References

1. Order of the Ministry of Labor of Russia dated October 29, 2021 No. 776n "On approval of the Model Regulations on the Occupational Safety and Health Management System" URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_403335/ (date of access November 10, 2025).
2. GOST 12.0.230.0.3-2016 "Interstate standard. Occupational safety standards

стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Оценка результативности и эффективности» URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_294354/ (дата обращения 10.11.2025).

3. Приказ Минтруда России от 22.04.2021 № 274н «Об утверждении профессионального стандарта «Специалист в области охраны труда» URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_384863/ (дата обращения 10.11.2025).

4. **Бакико, Е. В.** Оценка и прогнозирование профессиональной компетентности специалистов в области охраны труда по входным критериям / Е. В. Бакико // Вестник научного центра ВостНИИ промышленной и экологической безопасности. 2023. № 1. С.73-85.

5. **Бакико, Е. В.** Оценка профессиональной компетентности специалистов в области охраны труда методом экспресс-диагностики / Е. В. Бакико // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2022. № 4. С.38-46.

system. Occupational safety management systems. Evaluation of performance and effectiveness." URL:

https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_294354/ (date of access 10.11.2025).

3. Order of the Ministry of Labor of Russia dated April 22, 2021 No. 274n "On approval of the professional standard "Specialist in the field of labor protection" URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_384863/ (date of access 11/10/2025).

4. **Bakiko, E. V.** Assessment and forecasting of professional competence of specialists in the field of labor protection based on input criteria / E. V. Bakiko // Bulletin of the scientific center VostNII Industrial and Environmental Safety. 2023. No. 1. P. 73-85.

5. **Bakiko, E. V.** Assessment of professional competence of specialists in the field of labor protection using the express diagnostics method / E. V. Bakiko // Bulletin of the Scientific Center for Work Safety in the Coal Industry. 2022. No. 4. P. 38-46.

E. V. Bakiko

ANALYSIS OF THE IMPACT OF SPECIALIST COMPETENCE ON THE PERFORMANCE INDICATORS OF AN OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY MANAGEMENT SYSTEM

Abstract. This paper analyzes the impact of occupational safety specialists' professional competence on the performance indicators for assessing the effectiveness and efficiency of an organization's occupational safety management system.

Based on Russian Federation regulations governing a systems approach to occupational safety management, aspects of assessing the effectiveness and efficiency of occupational safety activities in an organization are identified.

A contingency table illustrates the functional relationship between the performance of occupational safety specialists and changes in the effectiveness and efficiency indicators of the occupational safety management system in its assessment.

An expert assessment identifies performance indicators for the occupational safety management system that confirm the influence of the level of professional competence of occupational safety specialists on changes in the effectiveness and efficiency indicators of the organization's occupational safety activities, both directly and indirectly.

Keywords: occupational health and safety management system, performance indicators, occupational health and safety specialist, competence/

For citation: Bakiko, E. V. Analysis of the Impact of Specialist Competence on the Performance Indicators of an Occupational Health and Safety Management System / E. V. Bakiko // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 8–13. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_8.

Сведения об авторах**Бакико Елена Владимировна**

Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро автоматики»,
отдел промышленной, экологической
безопасности и охраны труда,
специалист по охране труда,
e-mail: bakiko@mail.ru

Information about the authors**Bakiko Elena Vladimirovna**

Joint Stock Company «Central Design Bureau of Automation»,
Department of Industrial, Environmental
Safety and Labor Protection,
Occupational Safety Specialist,
e-mail: bakiko@mail.ru

И.А. Баланов, М. В. Баланова, М. А. Горин

СНИЖЕНИЕ РИСКОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Аннотация. В современном мире вопрос о охране труда при эксплуатации грузоподъемных механизмов на железнодорожном транспорте занимает высокую позицию. В данной статье будут исследованы факторы риска, статистика нарушений и отказов, будут предложены методы оценивания и снижения риска, а также будет разработан комплекс технических и организационных мероприятий для обеспечения большей безопасности.

Ключевые слова: охрана труда, анализ условий труда, факторы риска, нарушение

Для цитирования: Баланов, И. А. Охрана труда при работе с грузоподъемными механизмами на железнодорожном транспорте / И.А. Баланов, М.В. Баланова, М.А. Горин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4 – С. 14–18. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_14.

Введение Железнодорожный транспорт играет ключевую роль в логистической системе любой страны, обеспечивая перевозку грузов и пассажиров на значительные расстояния. Важнейшим элементом инфраструктуры являются грузоподъемные машины и механизмы, используемые для погрузочно-разгрузочных работ, обслуживания и ремонта железнодорожной техники, а также при строительстве и реконструкции путей. Эксплуатация грузоподъемных механизмов на железнодорожных объектах относится к категории повышенной опасности в виду того, что эта отрасль инфраструктуры, является ключевой в нашей стране, которая обеспечивает устойчивую работу экономики, а также систем снабжение и бесперебойное движение пассажирских и грузовых составов. Каждый день на объектах железной дороги происходит бесчисленное количество операций, к примеру: по приему, отправлению, переработке, загрузке грузов, большая часть из которых требует неотъемлемого применения грузоподъемных механизмов таких как: мостовых кранов, домкратов, стационарных и мобильных подъемных устройств, тельферов, козловых кранов. Без данного оборудования невозможно было бы перемещение тяжелых грузов – контейнеров, крупногабаритных деталей, материалов верхнего строения железнодорожного пути. Учитывая всю сложность и важность железнодорожной инфраструктуры, а так же грузоподъемных механизмов, можно сформулировать «некий» перечень причин почему это опасно:

- операции выполняются вблизи железнодорожных путей с непрерывным движением подвижного состава;
- зачастую проведение работ осуществляется в тесных местах и с не 100% видимостью ввиду различных факторов (погоды, освещения и т.д.);
- операторы находятся под давлением регламента и дедлайнов на погрузку или разгрузку к примеру;
- технические узлы грузоподъемных механизмов подвергаются огромной нагрузке, что приводит к износу и усталости металла.

Таким образом, работа с грузоподъемными механизмами является крайне опасной для жизни человека, по статистике из ведомственных структур, 30-45% травматизма происходит ежегодно, в которых 70 % инцидентов обусловлено человеческим фактором.

Основная часть. Весь процесс эксплуатации грузоподъемных механизмов строго регулируется значительным комплексом федеральных законов, технического регламента, правил и стандартов, которые определяют четкие требования к проектированию, использованию, квалификации рабочего и своевременному техническому обслуживанию. Итак, к федеральным законам относятся такие документы, как Федеральный закон №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектах», который определяет необходимость регистрации в госреестре, идентификации объектов, проведении контроля и проверки безопасности. Трудовой кодекс (раздел 10), который обязывает работодателя обеспечить безопасные условия труда, инструктажи, обучение и медицинские осмотры. К нормативно-правовым актам железнодорожного транспорта относятся такие документы, как «Правила технической эксплуатации железных дорог в РФ (ПТЭ)», которая применяется в координации работы кранов совместно с движением поездов, а также безопасные расстояния до контактных сетей. ГОСТ 9238-2013 «Габариты приближения строений и подвижного состава» в котором есть обязательство четкого вписывания кранов, грузов в габарит для исключения касания подвижного состава и контактной сети. Данный ГОСТ особенно важен, так как по исследованию статистики, не вписывание габарита является одной из самой частой причины аварии. ISO 4306, 4309, 9927 в которых заложены термины, классификация, контроль состояния крюков и канатов. Количество и качество надзора со стороны государства остается на высоком уровне.

Повышение безопасности рабочих при использовании грузоподъемных механизмов на железнодорожном транспорте возможно только при комплексном подходе, который включает в себя технические, организационные, цифровые решения, обучающие, а также инженерно-планировочные.

К техническим мероприятиям относятся: оснащение механизмов современными системами безопасности (датчики, ограничители, устройства аварийной остановки с дистанционным управлением, автоматические ограничители зоны работы, а также система кренов и устойчивости), неотъемлемый контроль и регулярная диагностика и контроль крюковых подвесок, обязательная замена канатов при снижении их прочности больше, чем на 15%).

К организационным мероприятиям относятся: стандартизация взаимодействия с дежурным по станции (запрет перемещения груза над занятым путем, фиксация разрешения на работу), разработка матрицы ответственности (машинист крана отвечает за безопасность управления, сигнальщик за подачу команд и контроль зон работы).

К цифровым решениям относятся: использование искусственного интеллекта для расчёта возможных аварий и перегрузок, встроенные видеосистемы для предотвращений столкновений (к примеру: LIDAR + AI). Так же положительно скажется использование мероприятий по безопасности, в которых будет проводиться регулярный анализ «почти-происшествий» или система поощрений за выявленные опасные условия.

Стоит отметить, нормативно-правовая база, которая регулирует эксплуатацию грузоподъемных механизмов в железнодорожной инфраструктуре, не ограничивается вышеперечисленными документами. Не мало важное значение имеют Федеральные законы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные механизмы», регламентирующие правильность использования и своевременного обслуживания. Данные документы формируют основные требования, соблюдение которых гарантированно сводит вероятность травм и повреждений при использовании грузоподъемных механизмов к минимальному проценту, тем самым увеличивая безопасность труда рабочего персонала.

Уровень безопасности также определяется внедрением дополнительных технических решений. К ним относятся самые разные системы наблюдения в реальном времени, которые используют датчики нагрузки, шума, вибрации, а также позволяющие заранее предотвратить аварийные ситуации на стадии их предпосылок и своевременно провести техническое

обслуживание. Широкое распространение получают автоматизированные ограничители зоны работы, интеграции видеосистем, цифровые копии механизмов. Такие технологии позволяют существенно уменьшить вероятность отказа и ошибки по причине «человеческого» фактора.

Существенный эффект может быть также достигнут использованием цифровых инструментов безопасности, таких как систем предиктивной аналитики, прогнозирующих износ канатов и конструкций. Применение данных технологий так же снизит вероятность травматизма рабочего персонала и позволит минимизировать влияние человеческого фактора, который, по статистике официального реестра является причиной большинства инцидентов при работе с грузоподъемными механизмами.

Таким образом, при использовании данного комплекса решений для увеличения безопасности труда, мы получим снижение производственных травм, примерно на 40-60%, количество отказов техники на 25-30%, простой будет снижен примерно на 20-25%, но и не мало важно, будут снижены экономические потери.

Вывод. Использование грузоподъемных механизмов сопровождается высокой опасностью, что подтверждается в статистике государственных ведомств, но отказаться от их использования нельзя. Главный фактор служащий для возникновения аварий является — человеческий фактор. Анализ нормативных документов, требований и практики показывает необходимость комплексного подхода к этой сфере для снижения рисков. Предложенный комплекс мероприятий и решений в данной статье значительно повлияют на безопасность персонала при взаимодействии с грузоподъемными механизмами, что значительно снизит вероятность травм, аварий.

Снижение рисков при эксплуатации грузоподъемных машин и механизмов на железнодорожном транспорте – это комплексная задача, требующая интеграции технических и организационных мер, а также учета человеческого фактора. Постоянный контроль, обучение персонала, своевременное техническое обслуживание и модернизация оборудования – это ключевые элементы обеспечения безопасной и надежной работы грузоподъемных механизмов на железнодорожном транспорте. Только при комплексном подходе можно минимизировать риски и обеспечить безопасность персонала, сохранность перевозимых грузов и бесперебойной работы железнодорожной инфраструктуры.

Список литературы

1. **Финоченко, Т. А.** Профессиональный риск на основе специальной оценки условий труда / Т. А. Финоченко, Е. А. Семиглазова // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3(46). – С. 62. – EDN ZWZEVH.
2. **Яицков, И. А.** Проблемы негативного воздействия производственного шума на работников железнодорожного транспорта / И. А. Яицков, И. Г. Переверзев, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4. – С. 112-114. – EDN YURPTF.
3. **Безопасность жизнедеятельности** / Т. А. Финоченко, И. Г. Переверзев, И. А. Яицков [и др.]; Ростовский государственный университет путей сообщения. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей

References

1. **Finochenko, T. A.** Professional risk based on a special assessment of working conditions / T. A. Finochenko, E. A. Semiglazova // Engineering Bulletin of the Don. - 2017. - No. 3 (46). - P. 62. - EDN ZWZEVH.
2. **Yaitskov, I. A.** Problems of the negative impact of industrial noise on railway workers / I. A. Yaitskov, I. G. Pereverzev, T. A. Finochenko // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. – 2018. – № 4. – S. 112-114. – EDN YURPTF.
3. **Life Safety** / T. A. Finochenko, I. G. Pereverzev, I. A. Yaitskov [et al.]; Rostov State Transport University. – 2nd edition, revised and supplemented. – Rostov-on-Don: Rostov State Transport University, 2019. – 308 p. – ISBN 978-5-88814-843-3. – EDN JPKTRR.

сообщения, 2019. – 308 с. – ISBN 978-5-88814-843-3. – EDN JPKTRR.

4. Методические рекомендации по оценке условий труда для основных профессий ОАО РЖД / В. А. Финоченко, Т. А. Финоченко, В. А. Назимко [и др.]. – Ростов-на-Дону Ростовский государственный университет путей сообщения, 2012. – 73 с. – EDN RJOHZIP.

5. **Таранушина, И. И.** Оформление процедуры выявления опасностей и оценки профессиональных рисков / И. И. Таранушина, О. В. Попова, Т. А. Финоченко // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 1. – С. 73-81. – DOI 10.24000/0409-2961-2020-1-73-81. – EDN VVYQJC.

6. Актуальные проблемы обеспечения охраны труда на производстве / М. Э. Цаболова, А. А. Ташчян, Т. А. Финоченко, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1(66). – С. 100-104. – EDN BSRDEM.

7. **Финоченко, Т. А.** Обеспечение безопасности технологических систем предприятий транспортной инфраструктуры / Т. А. Финоченко, И. А. Баланов, С. В. Борисов [и др.] // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4(61). – С. 109-113. – EDN VRKCF.

8. **Финоченко, Т. А.** Влияние количественной оценки условий труда на величину производственного риска / Т. А. Финоченко, И. Г. Переверзев, В. А. Финоченко // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4(47). – С. 139. – EDN YUQKXO.

9. **Семиглазова, Е. А.** Управление профессиональными рисками / Е. А. Семиглазова, Т. А. Финоченко // Транспорт и логистика: инновационное развитие в условиях глобализации технологических и экономических связей: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 241-245. – EDN ZGGLWJ.

4. Methodological recommendations for assessing working conditions for the main professions of JSC Russian Railways / V. A. Finochenko, T. A. Finochenko, V. A. Nazimko [et al.]. – Rostov-on-Don Rostov State Transport University, 2012. – 73 p. – EDN RJOHZIP.

5. **Taranushina, I. I.** Registration of the procedure for identifying hazards and assessing professional risks / I. I. Taranushina, O. V. Popova, T. A. Finochenko // Occupational safety in industry. – 2020. – No. 1. – P. 73-81. – DOI 10.24000/0409-2961-2020-1-73-81. – EDN VVYQJC.

6. Current issues of occupational safety and health in production / M. E. Tsabolova, A. A. Tashchiyan, T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. – 2024. – No. 1 (66). – P. 100-104. – EDN BSRDEM.

7. **Finochenko, T. A.** Ensuring the Security of Technological Systems of Transport Infrastructure Enterprises / T. A. Finochenko, I. A. Balanov, S. V. Borisov [et al.] // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. – 2022. – No. 4 (61). – P. 109-113. – EDN VRKCF.

8. **Finochenko, T. A.** The influence of quantitative assessment of working conditions on the magnitude of industrial risk / T. A. Finochenko, I. G. Pereverzev, V. A. Finochenko // Inzhenernyy vestnik Dona. – 2017. – No. 4 (47). – P. 139. – EDN YUQKXO.

9. **Semiglazova, E. A.** Professional risk management / E. A. Semiglazova, T. A. Finochenko // Transport and logistics: innovative development in the context of globalization of technological and economic ties: Rostov State Transport University, 2017. – P. 241-245. – EDN ZGGLWJ.

I. A. Balanov, M. V. Balanova, M. A. Gorin

OCCUPATIONAL SAFETY WHEN WORKING WITH LIFTING MECHANISMS IN RAILWAY TRANSPORT

Abstract. In today's world, occupational safety and health during the operation of lifting equipment in rail transport is a high priority. This article will examine risk factors, statistics on violations and failures, propose risk assessment and mitigation methods, and develop a set of technical and organizational measures to ensure greater safety.

Keywords: occupational safety and health, analysis of working conditions, risk factors, violations

For citation: Balanov, I. A. Occupational Safety When Working with Lifting Mechanisms in Railway Transport / I.A. Balanov, M. V. Balanova, M. A. Gorin // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 14–18. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_14.

Сведения об авторах

Баланов Игорь Андреевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»,
аспирант
e-mail: igor.balanov@bk.ru

Баланова Мария Васильевна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: fmv04@mail.ru

Горин Максим Александрович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
студент,
e-mail: vipkarpov76@gmail.com

Information about the authors

Balanov Igor Andreevich

Rostov State Transport University (RGUPS),
Chair «Life Safety»,
postgraduate student
e-mail: igor.balanov@bk.ru

Balanova Maria Vasilievna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life Safety»,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: fmv04@mail.ru

Gorin Maxim Aleksandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Traction Rolling Stock»,
Student,
e-mail: vipkarpov76@gmail.com

Ю. А. Денисова, Д. А. Рудиков

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫМИ РИСКАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ НА ОСНОВЕ КОГНИТИВНО-ПРОФИЛИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ

Аннотация. В статье решается проблема доминирования человеческого фактора как ключевой причины производственного травматизма в высокорисковых отраслях, на примере железнодорожного транспорта. В отличие от традиционных реактивных подходов, предлагается комплексная проактивная методология, интегрирующая когнитивное моделирование причинно-следственных связей с вероятностно-статистическим профилированием профессиональной пригодности. Ядром исследования является оригинальная математическая модель системы «человек-технология-среда», формализованная с применением теории взвешенных графов и нечетких когнитивных карт. На ее основе разработан новый метод количественной оценки соответствия работника профессии через построение эталонного статистического профиля. Доказана эффективность интеграции методов FMEA и HRA в алгоритм риск-ориентированного проектирования технологических процессов. Апробация подтвердила результативность предложенных решений, выразившуюся в статистически значимом снижении уровня травматизма. Научная новизна заключается в синтезе когнитивного и квалитетического подходов, что позволяет перейти от констатации ошибок к прогнозированию и системной минимизации рисков, обусловленных человеческим фактором.

Ключевые слова: управление профессиональными рисками, человеческий фактор, железнодорожный транспорт, когнитивно-профилирующая модель, проактивная безопасность, функциональные сети, эталонный профиль профессии, риск-ориентированное проектирование.

Для цитирования: Денисова, Ю. А. Системный подход к управлению профессиональными рисками на железнодорожном транспорте на основе когнитивно-профилирующей модели / Ю. А. Денисова, Д. А. Рудиков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 19–25. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_19.

Введение

Современные системы управления безопасностью на критически важных объектах, таких как железнодорожный транспорт, сталкиваются с парадоксом: несмотря на повсеместную автоматизацию и цифровизацию, вклад человеческого фактора в аварийность и травматизм не только не снижается, но в определенных аспектах возрастает. Статистика ОАО «РЖД» недвусмысленно указывает, что от 50% до 75% инцидентов инициируются ошибочными или несанкционированными действиями персонала [1, 4–6]. Существующие, в основном, реактивные подходы, фокусирующиеся на расследовании уже произошедших событий, исчерпали свой потенциал. Они позволяют фиксировать, но не прогнозировать и системно предотвращать рискованные действия человека.

Возникает научно-практическая проблема, заключающаяся в необходимости разработки такого методологического аппарата, который позволил бы не просто учитывать человеческий фактор, а управлять им на основе предиктивного анализа и количественной оценки. Целью данного исследования является создание и верификация интегрированной

когнитивно-профилирующей модели, обеспечивающей проактивное управление профессиональными рисками за счет синтеза методов оценки системных взаимосвязей в цепи «человек-технология-среда» и вероятностного определения эталонных требований к профессиональной пригодности.

Методология и методы исследования

Методологический фундамент работы составляет принцип системного единства технических, технологических и человеческих компонентов производственной безопасности. Для декомпозиции этой сложной системы был применен синтез следующих методов:

1. Когнитивное моделирование. Использован аппарат нечетких когнитивных карт (Fuzzy Cognitive Maps) для визуализации и анализа нелинейных причинно-следственных связей между антропометрическими, физиологическими, психосоциальными (H) и технологическими (S), техническими (T), средовыми (E) факторами. Это позволило перейти от качественных описаний к полуколичественным оценкам силы влияний.

2. Вероятностно-статистическое профилирование. Разработан оригинальный метод построения эталонного профиля профессии $P_{\text{этал}}$, основанный не на нормативных предписаниях, а на статистическом анализе свойств H_i референтной группы «эталонных» работников (стаж > 10 лет, отсутствие нарушений, признанная высокая квалификация). Закон распределения каждого свойства H_i определялся эмпирически, а в качестве эталонного значения принималась мода распределения.

3. Функционально-сетевой анализ технологий. Технологические процессы были формализованы с помощью функциональных сетей (развитие идей А. И. Губинского [2]), что дало возможность не только декомпозировать процесс на типовые функциональные единицы (ТФЕ), но и количественно оценить его надежность через вероятность безошибочного выполнения B , выступающую ключевым критерием оптимизации.

4. Гибридный подход к оценке рисков. Предложена двухуровневая система:

– макроуровень: матричный анализ ретроспективных данных о травматизме и микротравмах с расчетом интегрального рейтинга потенциальной опасности подразделения R_j ;

– микроуровень: экспертно-аналитическая идентификация опасностей на рабочих местах с адаптацией методов FMEA [3] и HRA для оценки рисков отдельных операций через Приоритетное Число Риска (ПЧР).

Результаты и их обсуждение

Когнитивно-профилирующая модель системы. В результате исследования разработана и формализована интегральная модель (1), позиционирующая технологию как системообразующий элемент, связывающий человеческий потенциал (H) с техническими средствами (T) и средой (E):

$$\langle H, T, S, E, L \rangle, \quad (1)$$

где $H = \{H^{\text{ph}}, H^{\text{pl}}, H^{\text{ps}}, H^{\text{pr}}\}$ – множество антропометрических, физиологических, психосоциальных и профессиональных характеристик работника; $T = \{T^{\text{re}}, T^{\text{sa}}, T^{\text{er}}\}$ – множество показателей надежности технического средства, безопасности технического средства, эргономических характеристик технического средства; $S = \{S^{\text{qu}}, S^{\text{qt}}\}$ – множество качественных и количественных характеристик технологии; $E = \{E^{\text{in}}, E^{\text{ex}}\}$ – множество характеристик внутренней и внешней окружающей сред; $L = \{L^{\text{ne}}, L^{\text{fa}}\}$ – множество – ближних и дальних социальных окружений, а связь между компонентами описаны матрицей смежности

взвешенного ориентированного графа $W = \|w_{ij}\|$, $w_{ij} \in [0,1]$.

Научная новизна данного представления заключается в том, что весовые коэффициенты w_{ij} отражают не статические свойства, а динамическую вероятность нарушения связей (например, $w_{\text{сч}}$ – вероятность неприменения СИЗ при выполнении

операции). Это позволяет проводить сценарное моделирование и выявлять наиболее уязвимые точки системы до реализации негативного события.

Метод вероятностного профилирования профессии и оценка соответствия. В отличие от традиционных методов профотбора, опирающихся на жесткие нормативы, предложен динамический подход к формированию эталонного профиля профессии $P_{этал}$ (2):

$$P_{этал} = \{M(H_1), M(H_2), \dots, M(H_N)\}, \quad (2)$$

где $M(H_i)$ – мода распределения i -го свойства в референтной группе.

Для количественной оценки соответствия конкретного работника W эталону предложен показатель рассогласования Δ_w^p (3), имеющий ясную вероятностную интерпретацию:

$$\Delta_w^p = \frac{\sum_{i=1}^N f_{этал}(H_i) - f_w(H_i)}{n \cdot (1 - \theta(-\prod f_w(H_i)))} \quad (3)$$

где $f_w(H_i)$ – частота значения свойства в его статистическом распределении,
 $\theta(x)$ – функция Хевисайда.

Практическая значимость метода состоит в переходе от бинарной оценки «годен/не годен» к непрерывной шкале рассогласования, что позволяет выстраивать адресные программы развития и компенсации для персонала.

Алгоритм риск-ориентированного проектирования технологических процессов. Разработан комплексный алгоритм (рис. 1), ключевым отличием которого является интеграция анализа технологических и человеческих рисков на этапе проектирования:

1. Выявление критичных процессов на основе данных систем КАСАНТ и КАСАТ.
2. Их формализация в виде функциональных сетей и оценка базовой надежности B_0 .
3. Для каждой операции ТФЕ проводится параллельный анализ:
 - FMEA: определение ПЧР для технико-технологических несоответствий;
 - HRA: идентификация потенциальных ошибок персонала и их причин.
4. Синтез результатов FMEA и HRA для определения операций с максимальным совокупным риском.
5. Оптимизация процесса путем редизайна высокорисковых операций, что приводит к новому значению надежности $B_{opt} > B_0$.

Эффективность алгоритма подтверждена на примере редизайна технологии проверки замыкания стрелок, где ПЧР по ключевым операциям был снижен на 40–60 %.

Двухуровневая система оценки профессиональных рисков. Предложенная система устраняет разрыв между макро- и микроуровнем управления:

1. Макроуровень (регион, предприятие). Интегральный рейтинг R_j рассчитывается по формуле (4) на основе восьми нормированных показателей X_i (от частоты микротравм до результатов аудита СУОТ [7]) с весами k_i , определенными методом экспертных оценок (W Кендалла > 0.7):

$$R_j = \sum_{i=1}^8 k_i \cdot \left(\frac{X_{ij}}{\sum_j X_{ij}} \right) \quad (4)$$

2. Микроуровень (рабочее место). Проводится анкетирование работников и экспертное обследование рабочих мест с заполнением карт идентификации опасностей. Риски ранжируются, и формируется реестр недопустимых рисков для немедленного устранения [8, 9].

Такой подход позволяет руководству распределять ресурсы на основе объективных данных R_L , а на линейном уровне – фокусироваться на конкретных, локальных опасностях.

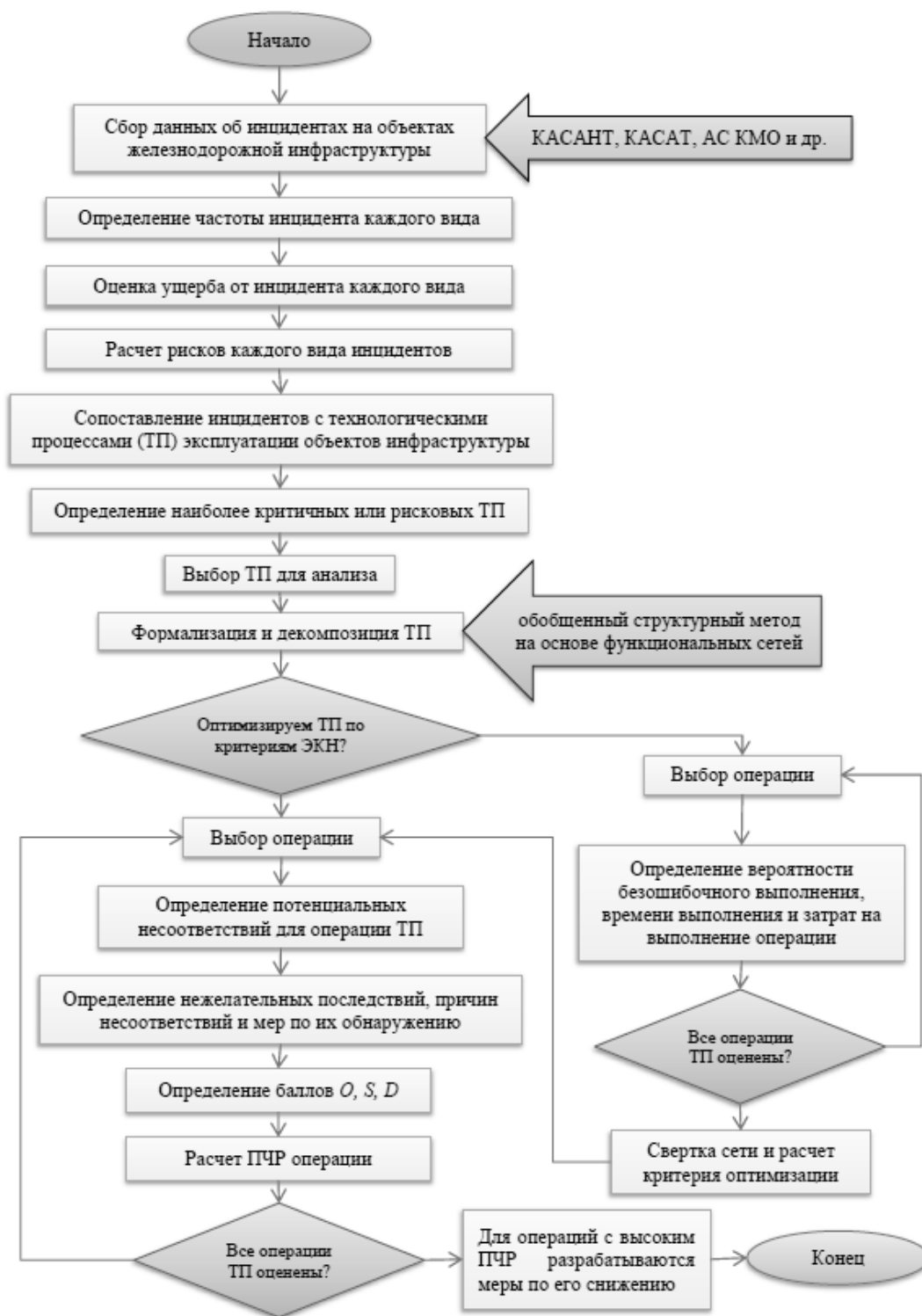


Рис. 1. Блок-схема алгоритма риск-ориентированного проектирования технологических процессов

Заключение и перспективы

Проведенное исследование демонстрирует результативность синтеза когнитивного и квалиметрического подходов для управления сложной социотехнической системой. Основные научные результаты заключаются в следующем:

1. Разработана и верифицирована когнитивно-профилирующая модель, позволяющая количественно оценивать влияние человеческого фактора на безопасность через призму надежности технологических связей.

2. Предложен инновационный метод вероятностного профилирования профессий, повышающий объективность профотбора и позволяющий прогнозировать потенциальную надежность работника.

3. Создан гибридный алгоритм риск-ориентированного проектирования, обеспечивающий синергию методов FMEA и HRA для превентивного снижения рисков на этапе разработки технологий.

4. Апробирована двухуровневая система оценки рисков, обеспечивающая сквозное управление безопасностью от рабочего места до уровня дирекции.

Практическая реализация разработанных решений показала не только снижение коэффициента частоты травматизма, но и рост производительности за счет оптимизации технологических процессов и повышения уровня компетенций персонала.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой программного комплекса, реализующего предложенные модели в режиме реального времени, и с адаптацией методологии для других высокорисковых отраслей, таких как энергетика и добывающая промышленность.

Список литературы

1. **Завьялов, А. М.** Повышение безопасности труда на железнодорожном транспорте на основе снижения влияния человеческого фактора: Дис. ... докт. техн. наук. – М.: РУТ (МИИТ), 2017. – 395 с.
2. **Губинский, А. И.** Надежность человеко-машинных систем. – М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
3. ГОСТ Р 51814.2-2001 Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов. – М.: Стандартиформ, 2001. – 27 с.
4. Risk Management in Transportation Safety System / T. A. Finochenko, L. V. Dergacheva, I. A. Yaitskov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2020 International Science and Technology Conference on Earth Science, ISTCEarthScience 2020, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. – IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 022050. – DOI 10.1088/1755-1315/666/2/022050. – EDN JZEOEI.
5. **Финоченко, Т. А.** Достойный труд – безопасный труд / Т. А. Финоченко, И. А.

References

1. **Zavyalov, A. M.** Improving labor safety in railway transport by reducing the influence of the human factor: Diss. ... Doctor of Technical Sciences. – M.: RUT (MIIT), 2017. – 395 p.
2. **Gubinsky, A. I.** Reliability of human-machine systems. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 256 p.
3. GOST R 51814.2-2001 Quality systems in the automotive industry. Method for analyzing the types and consequences of potential defects. – M.: Standartinform, 2001. – 27 p.
4. Risk Management in Transportation Safety System / T. A. Finochenko, L. V. Dergacheva, I. A. Yaitskov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2020 International Science and Technology Conference on Earth Science, ISTCEarthScience 2020, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. – IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 022050. – DOI 10.1088/1755-1315/666/2/022050. – EDN JZEOEI.
5. **Finochenko, T. A.** Decent work – safe work / T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo

Яицков // Труды РГУПС. – 2018. – № 2 (43). – С. 5–6.

6. **Борисова, А. В.** Риск-ориентированный подход к обеспечению безопасности труда / А. В. Борисова // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (50). – С. 5-7.

7. Специальная оценка условий труда как информационная база для внедрения риск-ориентированного подхода в сфере охраны труда / Т. А. Финоченко, В. А. Финоченко, Л. И. Воробинская // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (51). – С. 107–110.

8. **Новиков, Н. Н.** Несчастные случаи обусловленных человеческим фактором / Н. Н. Новиков, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2(67). – С. 87-98. – EDN VRESFY.

9. **Баланов, И. А.** Безопасный труд при эксплуатации железнодорожного подвижного состава / И. А. Баланов, Ю. А. Антонов, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2(67). – С. 19-24. – EDN MAQZQE.

universiteta putey soobshcheniya. - 2018. - No. 2 (43). - P. 5-6.

6. Borisova, A. V. Risk-oriented approach to ensuring occupational safety / A. V. Borisova // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2020. - No. 1 (50). - P. 5-7.

7. Special assessment of working conditions as an information base for the implementation of a risk-oriented approach in the field of occupational safety / T. A. Finochenko, V. A. Finochenko, L. I. Vorobinskaya // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2020. - No. 2 (51). - P. 107-110.

8. Novikov, N. N. Accidents caused by human factors / N. N. Novikov, T. A. Finochenko // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2024. - No. 2 (67). - P. 87-98. - EDN VRESFY.

9. Balanov, I. A. Safe work during operation of railway rolling stock / I. A. Balanov, Yu. A. Antonov, I. A. Yaitkov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2024. - No. 2 (67). - P. 19-24. - EDN MAQZQE.

Yu. A. Denisova, D. A. Rudikov

A SYSTEM APPROACH TO MANAGING OCCUPATIONAL RISKS IN RAILWAY TRANSPORT BASED ON A COGNITIVE-PROFILING MODEL

Abstract. The article addresses the problem of the human factor dominance as a key cause of occupational injuries in high-risk industries, using railway transport as an example. In contrast to traditional reactive approaches, a comprehensive proactive methodology is proposed, integrating cognitive modeling of cause-and-effect relationships with probabilistic-statistical profiling of professional suitability. The core of the research is an original mathematical model of the "human-technology-environment" system, formalized using the theory of weighted graphs and fuzzy cognitive maps. Based on it, a new method for quantitative assessment of an employee's compliance with the profession has been developed through the construction of a benchmark statistical profile. The effectiveness of integrating FMEA and HRA methods into the algorithm for risk-based design of technological processes is proven. Testing confirmed the effectiveness of the proposed solutions, resulting in a statistically significant reduction in the injury rate. The scientific novelty lies in the synthesis of cognitive and qualimetric approaches, which allows for a transition from stating errors to predicting and systematically minimizing risks caused by the human factor.

Keywords: occupational risk management, human factor, railway transport, cognitive-profiling model, proactive safety, functional networks, benchmark profession profile, risk-based design.

For citation: Denisova, Yu. A. A System Approach to Managing Occupational Risks in Railway Transport Based on a Cognitive-Profiling Model / Yu. A. Denisova, D. A. Rudikov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 19–25. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_19.

Сведения об авторах

Денисова Юлия Андреевна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедры «Безопасность жизнедеятельности»,
студент,
e-mail: kat101203@gmail.com

Рудиков Дмитрий Алексеевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедры «Безопасность жизнедеятельности»,
кандидат технических наук, доцент
e-mail: d-studio@mail.ru

Information about the authors

Denisova Yulia Andreevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life safety»,
Student,
e-mail: kat101203@gmail.com

Rudikov Dmitry Alekseevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life safety»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: d-studio@mail.ru

А. Б. Завьялов, Е. А. Мешкова, Т. В. Глухих

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация. В статье рассмотрены современные и перспективные технологии обеспечения пожарной безопасности (ПБ) на подвижном составе железнодорожного транспорта. Выполнен анализ инновационных решений — от аэрозольных и газовых установок тушения до применения инфракрасных сенсоров, адресной сигнализации и модулей искусственного интеллекта. Обоснована необходимость перехода от традиционных пороговых систем к интеллектуализированным и предиктивным комплексам, способным прогнозировать развитие ЧС и управлять системой безопасности в реальном времени.

Ключевые слова: пожарная безопасность, инновации, железнодорожный транспорт, аэрозольное тушение, ИК-сенсоры, адресная система, ИИ, автоматизация.

Для цитирования: Завьялов, А. Б. Инновационные технологии обеспечения пожарной безопасности на подвижном составе железнодорожного транспорта / А. Б. Завьялов, Е. А. Мешкова, Т. В. Глухих // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – №. 4 – С. 26–34. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_26.

Введение. Современные условия эксплуатации железнодорожного транспорта, особенно с учётом роста протяжённости маршрутов, увеличения скоростей и пассажиропотока, требуют кардинального пересмотра подходов к обеспечению пожарной безопасности. Ключевая проблема — высокая инерционность традиционных технических решений, основанных на пороговых датчиках, неадресных системах и ручном оповещении. Это приводит к запаздыванию обнаружения пожара, невозможности точной локализации очага и чрезмерному количеству ложных срабатываний [1].

В данной статье представлены современные и перспективные инновационные технологии в области ПБ на ПС, с акцентом на: аэрозольные и газовые модули нового поколения; инфракрасные сенсоры и тепловизоры; цифровые адресные системы; системы управления на основе искусственного интеллекта (ИИ). Для эффективного решения проблем пожарной безопасности на железнодорожном транспорте необходимо внедрение инновационных технологий и комплексных подходов, охватывающих все этапы - от проектирования подвижного состава до эксплуатации и обслуживания. Разработка и внедрение инновационных технологий обеспечения пожарной безопасности на подвижном составе железнодорожного транспорта являются критически важными для защиты жизни и здоровья пассажиров, сохранности имущества и обеспечения непрерывности транспортного процесса.

Аэрозольные и газовые модули пожаротушения: принципы и теоретическое обоснование

Аэрозольные средства тушения основаны на гетерогенном ингибировании свободнорадикальной реакции горения. В огне протекают цепные реакции с участием

активных радикалов (Н•, ОН•, О•). Аэрозоль, содержащий ионы калия (K⁺), при высокой температуре взаимодействует с радикалами и переводит их в неактивные соединения.

Согласно теории И.Ф. Гельперина [2], аэрозоль, содержащий твердые частицы с радиусом менее 1 мкм, способен эффективно диффундировать в зону горения, не осаждаясь на поверхности. Это позволяет применять аэрозоль в закрытых объемах железнодорожных отсеков без ущерба для электроники и конструкций.

Газовые огнетушащие составы (например, NOVEC 1230, CO₂, FK-5-1-12) работают за счёт [3]: разбавления кислорода до субкритического уровня (ниже 12%); поглощения тепла за счёт высокой теплоёмкости; химического ингибирования (для галогенсодержащих газов).

В таблице представлено краткое сравнение 3-х аэрозольных модулей пожаротушения – FirePro FP-200M, СПРУТ-0,5 и АУПТ-А15.

Таблица

Сравнение аэрозольных модулей

Характеристика	FirePro FP-200M	СПРУТ-0,5	АУПТ-А15
Объём пространства	до 8 м ³	до 5 м ³	до 10 м ³
Время срабатывания	2–5 сек	3 сек	2 сек
Температура активации	от +135 °С	от +120 °С	от +150 °С
Тип активации	термошнур, электрозапуск	термокабель	электропуск
Остаточное загрязнение	минимальное	низкое	низкое

Преимущества вышеуказанных аэрозольных модулей: высокая скорость тушения; возможность монтажа в труднодоступных зонах (электрощиты, технологические ниши); независимость от внешнего питания (в случае термошнура). Применение данных модулей идеально подходит для локомотивных отсеков, электрошкафов, купе при точечном размещении.

Инфракрасные и мультиспектральные сенсоры

ИК-сенсоры позволяют регистрировать начальные стадии возгорания, обнаруживая инфракрасное излучение от перегретых элементов, замыканий, перегрузок. За рубежом применяются следующие модели: FLIR (США) – тепловизионные модули с матрицами 160×120 или 320×240 пикселей, Siemens Cerberus PRO IR – интеграция с адресными системами, Minimax IR-Detector – применяется в поездах и метрополитенах ЕС.

Описание принципа действия ИК-камеры FLIR на подвижном составе

Инфракрасная (тепловизионная) камера FLIR, устанавливаемая в вагонах и локомотивах, предназначена для раннего обнаружения очагов перегрева, тления и скрытого возгорания, невидимых в видимом спектре [4].

Этапы работы:

1. сканирование моторного отсека, кабельных каналов, аккумуляторного отсека, багажных полок и электрощитов;
2. фиксация температурных зон – камера строит тепловую карту и сравнивает значения с нормативами (обычно +60 °С – порог тревоги);
3. аналитика и фильтрация – исключение ложных срабатываний (движущиеся тени, ИК-излучение от света);
4. передача тревожного сигнала: на пульт машиниста → в систему адресного оповещения → в блок автоматического пуска системы пожаротушения.

Преимущества ИК – камеры FLIR [5]: реакция за менее чем 2 секунды после появления перегрева, фиксация тепловых аномалий до начального задымления, устойчивость к засветке, вибрациям, влаге, возможность установки в скрытые зоны ПС, совместимость с системами ИИ-аналитики и модульного тушения.

В моторном отсеке локомотива ИК-камера FLIR A400 направлена на двигатель и распределительный щит (рис. 1). При перегреве кабеля выше 120 °С формируется тревожный сигнал, и активируется модуль МПП-100 [5].

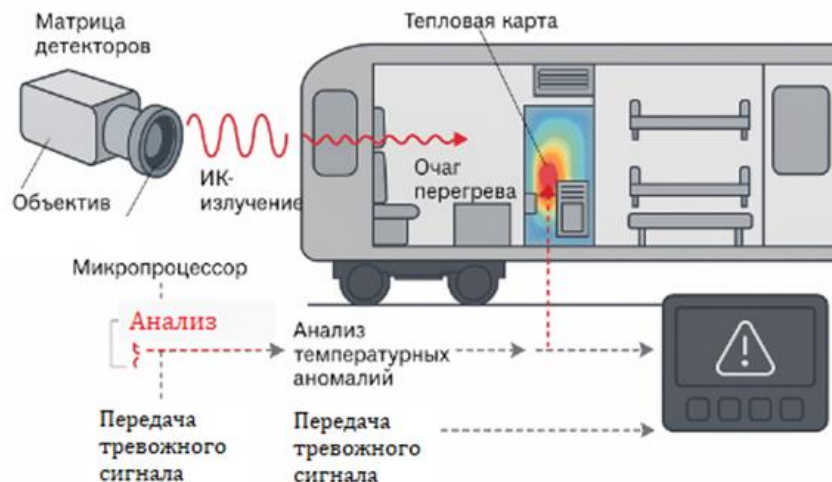


Рис.1. Принцип действия ИК-камеры FLIR на ПС

Описание принципа действия системы Siemens Cerberus PRO IR

Принцип действия системы Siemens Cerberus PRO IR (на основе инфракрасной технологии) заключается в использовании тепловизионного (ИК) детектора для непрерывного контроля температурных аномалий в охраняемой зоне. Такая система может эффективно работать на подвижном составе (ПС), особенно в труднодоступных, пыльных или шумных зонах, где традиционные датчики дыма и пламени малочувствительны или неэффективны [6].

Основные этапы работы Siemens Cerberus PRO IR (рис. 2):

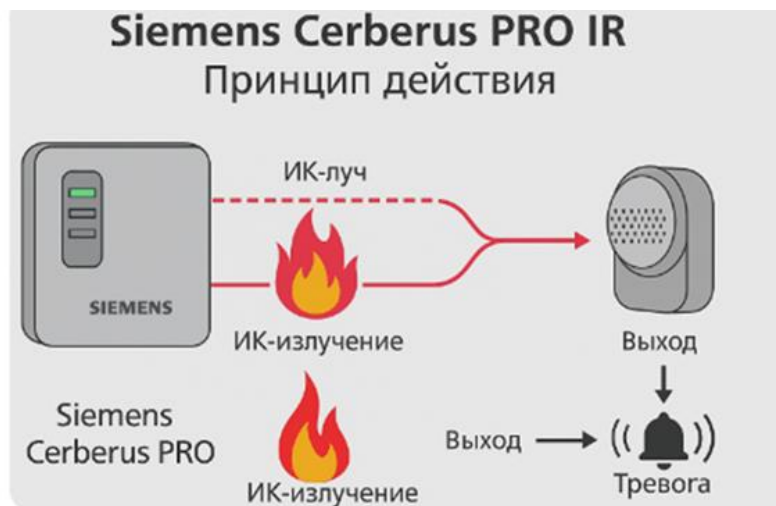


Рис. 2. Принцип действия Siemens Cerberus PRO IR

1. непрерывное инфракрасное сканирование - инфракрасный сенсор фиксирует тепловое излучение от объектов, машин, поверхностей и воздуха в зоне контроля (это пассивный процесс - излучение не создается системой, а лишь принимается от окружающей среды);

2. формирование тепловой карты (термограммы) - устройство преобразует зафиксированное излучение в цифровое изображение, где каждый пиксель соответствует определённой температуре, далее создается карта температурного распределения, позволяющая видеть даже небольшие отклонения от нормы;

3. обнаружение аномалий - специальные алгоритмы сравнивают текущие температурные значения с установленными порогами (например, +75 °С в зоне электрошкафа); при превышении порога, резком росте температуры или локальной перегреве срабатывает тревога;

4. передача сигнала тревоги - при срабатывании алгоритма ИК-камера отправляет тревожный сигнал на центральный блок системы Cerberus PRO (рис.2), далее происходит включение системы оповещения, активацию модулей автоматического пожаротушения, удалённую передачу сигнала по CAN/RS485/LON к управляющим системам ПС или диспетчеру;

5. поддержка архивирования и предиктивной диагностики - система может вести журнал температурных изменений и анализировать тренды; это позволяет выявить потенциально опасные зоны задолго до пожара (например, перегревающиеся кабели или тормозные узлы) [42].

Преимущества внедрения Cerberus PRO IR на ПС:

- быстрое реагирование до появления видимого дыма,
- работоспособность при вибрациях, запылении, задымлении и низкой освещённости,
- интеграция с другими ПБ-системами Siemens (АПТ, оповещение, SCADA),
- возможность автономной и сетевой работы,
- высокая точность и адаптация к температурным условиям внутри ПС.

ИК-камеры, такие как Siemens Cerberus PRO IR, обеспечивают интеллектуальный подход к раннему обнаружению пожара на железнодорожном транспорте, позволяя не только реагировать на инцидент, но и предсказывать его. Это особенно важно в локомотивах, вагон-ресторане, технических зонах и высокоскоростных поездах.

Перспективы внедрения автоматизированных и интеллектуальных систем

Современные тенденции в транспортной безопасности неразрывно связаны с автоматизацией, цифровизацией и внедрением технологий искусственного интеллекта (ИИ). В области пожарной безопасности (ПБ) это проявляется в переходе от пассивных, реактивных решений к проактивным интеллектуальным системам, способным предугадывать, распознавать и реагировать на потенциальную угрозу до её катастрофического развития [6].

Архитектура автоматизированных систем ПБ

Автоматизированная система пожарной безопасности (АСПБ) представляет собой иерархически организованную цифровую платформу, включающую [7]:

- уровень датчиков и сенсоров:
 1. дымовые, тепловые, ИК и мультиспектральные извещатели;
 2. сенсоры температуры оборудования, утечек тока, скачков напряжения.
- логический уровень обработки (контроллеры):
 1. получение и первичная фильтрация сигналов;
 2. проверка на ложные срабатывания.
- аналитический уровень (ИИ-модуль):
 1. модели на основе машинного обучения (ML), обученные на событиях возгораний;
 2. прогнозирование вероятности пожара по аномалиям в работе оборудования.
- уровень управления:
 1. автоматический запуск систем АУПТ;
 2. определение маршрутов эвакуации;
 3. передача данных на ЦПУ, диспетчерские центры и мобильные устройства машиниста.

Интеллектуальный анализ в ПБ: принципы и возможности

ИИ-системы в контексте пожарной безопасности [8] ориентированы на:

1. предиктивную аналитику: выявление «предпожарных» режимов (например, перегрев кабеля, чрезмерный ток, перегрузка розеток);

2. сценарный анализ: моделирование развития очага с учётом ветров, перегородок, количества людей;

3. адаптивную реакцию: запуск локализованных систем тушения, отключение подачи питания, открытие дверей в безопасную сторону.

Примеры сценариев внедрения ИИ в поездах

Развитие искусственного интеллекта (ИИ) в транспортной отрасли обусловлено необходимостью перехода от систем реагирования к системам прогнозирования. В условиях железнодорожного транспорта, где критически важна оперативность реагирования на инциденты, интеграция ИИ в архитектуру пожарной безопасности (ПБ) позволяет предугадывать развитие пожароопасной ситуации, локализовать её на ранней стадии и минимизировать последствия.

Интеграция ИИ в ПБ не означает замену традиционных датчиков или модулей тушения — напротив, она расширяет их функциональность за счёт анализа больших данных, выявления скрытых закономерностей и управления событиями в реальном времени [9]. Рассмотрим несколько типов ПС:

- пассажирский вагон дальнего следования:
 1. мониторинг температур розеток, освещения, замыканий;
 2. анализ ИК-данных от нагрева пола, потолка и приборов;
 3. предсказание опасности и запуск аэрозольного модуля локально.
- локомотив:
 1. диагностика состояния тяговых двигателей, АКБ, дизеля;
 2. предупреждение машиниста об аномальном нагреве 3 минуты до отказа;
 3. автоматическое отключение питания и запуск тушения в моторном отсеке.
- высокоскоростной состав:
 1. интеграция ИИ-модуля в систему жизнеобеспечения;
 2. взаимодействие с цифровой платформой диагностики (Siemens Railigent);
 3. передача данных в облачную среду для построения модели деградации оборудования.

Принципиальная логическая схема на основе данных с извещателей и тепловизоров объясняет алгоритм действий ИИ-модуля: от входных данных до команды на разблокировку дверей или включение пожаротушения и представлен на рисунке 3.

Внедрение интеллектуальных систем ПБ должно стать частью более широкой программы:

1. цифровая трансформация ж.д. транспорта (в рамках нацпроекта "Безопасные и качественные дороги");
2. унификация платформ контроля (единая среда — от видеонаблюдения до ПБ);
3. синхронизация с ПЛК, АСУ ТП и системой телеметрии РЖД;
4. технический стандарт ИИ для безопасности ПС (разработка совместно с Минцифры и НИИАС).

К потенциальным эффектам внедрения интеллектуальных систем можно отнести следующее: снижение пожаров на 70–90% в наиболее рискованных зонах; исключение человеческого фактора на этапе реагирования; рост доверия пассажиров и репутационные дивиденды; финансовая устойчивость — страховые бонусы, экономия на ремонте и компенсациях; аналитика для проектировщиков ПС — новые данные о слабых местах конструкции.



Рис. 3. Алгоритм действий ИИ-модуля

Заключение. Внедрение инновационных технологий обеспечения пожарной безопасности на подвижном составе железнодорожного транспорта является приоритетной задачей, требующей комплексного и системного подхода. Разработка и применение новых материалов, автоматических систем пожарной сигнализации и пожаротушения, систем дымоудаления и оповещения о пожаре, интеллектуальных систем управления пожарной безопасностью, а также совершенствование методов эвакуации и обучения персонала позволят значительно повысить уровень безопасности железнодорожного транспорта и снизить риск возникновения пожаров с тяжелыми последствиями.

Современное состояние железнодорожного транспорта предъявляет к системам пожарной безопасности (ПБ) принципиально новые требования: это и высокая скорость реагирования, и способность к работе в автономном режиме, и интеграция с другими бортовыми системами. Проанализированные в статье инновационные решения – аэрозольные установки, инфракрасные сенсоры, адресные системы и алгоритмы искусственного интеллекта (ИИ) – позволяют сформировать качественно иной уровень пожарозащиты, недостижимый традиционными средствами.

Прежде всего, аэрозольные установки тушения, благодаря своей энергонезависимости, высокой эффективности в ограниченных объемах и минимальному загрязнению, являются оптимальными для узлов подвижного состава, где критична скорость тушения (электрощиты, батарейные отсеки, дизельные установки). Газовые средства (NOVEC 1230, FK-5-1-12) могут применяться в более крупных пространствах, обеспечивая тушение без ущерба для электроники.

ИК-сенсоры и тепловизоры обеспечивают раннее обнаружение возгорания – на стадии перегрева, задолго до появления дыма. Это даёт уникальную возможность своевременно локализовать угрозу, автоматически предупредить машиниста и ЦУП, отключить опасные системы. Их применение особенно оправдано в высоконагруженных теплотехнических и электрических зонах.

Адресные системы пожарной сигнализации позволяют существенно повысить точность, надёжность и масштабируемость ПБ. В отличие от шлейфовых систем, они дают возможность анализировать сигналы в динамике, задавать различные сценарии срабатывания, автоматически включать противопожарные модули, разблокировать двери и передавать тревоги через цифровые каналы связи. Особое внимание заслуживает внедрение ИИ, который

в системах ПБ обеспечивает: предиктивную аналитику на основе шаблонов температур и задымления; фильтрацию ложных тревог; принятие решений о характере и масштабах реагирования; интеграцию с цифровым двойником вагона или поезда.

ИИ обеспечивает переход от реактивной к проактивной модели безопасности, где система не просто «фиксирует» факт пожара, а предугадывает его возникновение и масштаб последствий, минимизируя человеческий фактор.

Таким образом, инновационные технологии ПБ на подвижном составе – не просто техническое усовершенствование. Это переход к интеллектуальной, автономной, цифровой экосистеме безопасности, которая способна обеспечить сохранение жизни и имущества при минимальных затратах и высокой надёжности. Их широкое внедрение требует системного подхода, включающего не только техническую реализацию, но и нормативное закрепление, подготовку персонала и масштабирование на федеральном уровне.

Дальнейшее развитие технологий пожарной безопасности на железнодорожном транспорте будет связано с внедрением искусственного интеллекта, машинного обучения и больших данных для анализа пожароопасных ситуаций и прогнозирования возникновения пожаров. Разработка и применение новых поколений средств пожаротушения, таких как аэрозольные и водяные завесы, также будут способствовать повышению эффективности борьбы с пожарами на железнодорожном транспорте.

Список литературы

1. **ГОСТ Р 53325–2012.** Технические средства охранно-пожарной сигнализации. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013. – 41 с.
2. **Бабкин Н. М., Мешкова Е. А.** Использование искусственного интеллекта в системах пожарной безопасности транспорта // Вестник транспортной науки. – 2023. – № 4(92). – С. 33–39.
3. **СП 5.13130.2009.** Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования. – М.: МЧС России, 2009. – 61 с.
4. **NFPA 130:** Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems. – National Fire Protection Association (USA), 2023. – 97 p.
5. **EN 45545-2:2020.** Railway applications – Fire protection on railway vehicles – Part 2: Requirements for fire behavior of materials and components. – European Committee for Standardization, 2020. – 85 p.
6. **UL 268:** Smoke Detectors for Fire Alarm Signaling Systems. – Underwriters Laboratories, USA, 2021. – 68 p.
7. **Van Trigt P.** Developing and delivering aerosol extinguishing systems for the rail sector // Global Railway Review. — 18 Feb. 2021.

References

1. **GOST R 53325–2012.** Technical means of fire and security alarm systems. General technical requirements and test methods. – Moscow: Standartinform, 2013. – 41 p.
2. **Babkin N. M., Meshkova E. A.** Use of artificial intelligence in transport fire safety systems // Bulletin of transport science. - 2023. - No. 4 (92). - P. 33-39.
3. **SP 5.13130.2009.** Fire protection systems. Automatic fire alarm and fire extinguishing systems. Design standards and rules. – Moscow: EMERCOM of Russia, 2009. – 61 p.
4. **NFPA 130:** Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems. – National Fire Protection Association (USA), 2023. – 97 p.
5. **EN 45545-2:2020.** Railway applications – Fire protection on railway vehicles – Part 2: Requirements for fire behavior of materials and components. – European Committee for Standardization, 2020. – 85 p.
6. **UL 268:** Smoke Detectors for Fire Alarm Signaling Systems. – Underwriters Laboratories, USA, 2021. – 68 p.
7. **Van Trigt P.** Developing and delivering aerosol extinguishing systems for the rail

8. **Капитонов А. В., Жуков М. И., Иванов С. Ю.** Инновационные системы пожаротушения на подвижном составе // Безопасность в техносфере. – 2022. – № 2(36). – С. 55–61.

9. **Хрусталёв, И. В.** Перспективы развития адресных систем пожарной сигнализации в подвижном составе // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 6. – С. 22–27.

10. **Финоченко, Т. А.** Обеспечение безопасности технологических систем предприятий транспортной инфраструктуры / Т. А. Финоченко, И. А. Баланов, С. В. Борисов [и др.] // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4(61). – С. 109-113. – EDN VRKCF.

11. **Баланов, И. А.** Безопасный труд при эксплуатации железнодорожного подвижного состава / И. А. Баланов, Ю. А. Антонов, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2(67). – С. 19-24. – EDN MAQZQE.

12. **Завьялов, А. Б.** Методологические основы анализа рисков пожара на железнодорожном транспорте / Завьялов А. Б., Мешкова Е. А. // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3. – С. 17 – 23.

13. **Мешкова, Е. А.** Действующие системы пожарной безопасности на железнодорожном транспорте в РФ / Е. А. Мешкова, А. Б. Завьялов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3. – С. 33 – 41.

sector // Global Railway Review. — 18 Feb. 2021.

8. **Kapitonov A. V., Zhukov M. I., Ivanov S. Yu.** Innovative fire extinguishing systems on rolling stock // Safety in the technosphere. - 2022. - No. 2 (36). - P. 55-61.

9. **Khrustalev, I. V.** Prospects for the development of addressable fire alarm systems in rolling stock // Railway transport. - 2021. - No. 6. - P. 22-27.

10. **Finochenko, T. A.** Ensuring the safety of technological systems of transport infrastructure enterprises / T. A. Finochenko, I. A. Balanov, S. V. Borisov [et al.] // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2022. - No. 4 (61). - P. 109-113. - EDN VRKCF.

11. **Balanov, I. A.** Safe work during operation of railway rolling stock / I. A. Balanov, Yu. A. Antonov, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2024. - No. 2 (67). - P. 19-24. - EDN MAQZQE.

12. **Zavyalov, A. B.** Methodological foundations of fire risk analysis in railway transport / Zavyalov A. B., Meshkova E. A. // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2025. - No. 3. - P. 17 - 23.

13. **Meshkova, E. A.** Current fire safety systems in railway transport in the Russian Federation / E. A. Meshkova, A. B. Zavyalov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2025. - No. 3. - P. 33 - 41.

A. B. Zavyalov, E. A. Meshkova, T. V. Glukhikh

INNOVATIVE TECHNOLOGIES TO ENSURE FIRE SAFETY ON RAILWAY ROLLING STOCK

Abstract. The article considers modern and perspective technologies of fire safety (FS) on the rolling stock of railway transportation. The article analyzes innovative solutions - from aerosol and gas extinguishing units to the use of infrared sensors, addressable signaling and artificial intelligence modules. The necessity of transition from traditional threshold systems to intellectualized and predictive complexes capable of predicting the development of emergency situations and managing the security system in real time is substantiated.

Keywords: fire safety, innovations, railway transport, aerosol extinguishing, IR sensors, addressable system, AI, automation.

For citation: Zavyalov, A. B. Methodological Bases of Fire Risk Analysis on Railway Transport / A. B. Zavyalov, E. A. Meshkova, T. V. Glukhikh // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 26–34. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_26.

Сведения об авторах

Завьялов Алексей Борисович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО ПГУПС), кафедра «Техносферная и экологическая безопасность», старший преподаватель, e-mail: zenitpiter91@inbox.ru

Мешкова Елизавета Алексеевна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО ПГУПС), кафедра «Техносферная и экологическая безопасность», студент, e-mail: elizaveta_meshkova@list.ru

Глухих Татьяна Владимировна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО ПГУПС), кафедра «Техносферная и экологическая безопасность», студент, e-mail: gluhih_tv@mail.ru

Information about the authors

Zavyalov Alexey Borisovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), Chair «Technosphere and Environmental Safety», Senior Lecturer, e-mail: zenitpiter91@inbox.ru

Meshkova Elizaveta Alekseevna

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), Chair «Technosphere and Environmental Safety», Student, e-mail: elizaveta_meshkova@list.ru

Glukhikh Tatyana Vladimirovna

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), Chair «Technosphere and Environmental Safety», Student, e-mail: gluhih_tv@mail.ru

Н. О. Зонова

ПРОБЛЕМЫ УЧЕТА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА ПРИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ РИСКОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПАСНОСТЕЙ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

Аннотация. В работе рассмотрены основные компоненты учета влияния человеческого фактора. Сложность оценить количественно человеческий фактор является основной проблемой его учета при оценке рисков воздействия опасностей. Многие авторы разрабатывают методы количественной оценки профессиональных, физиологических, антропометрических и других свойств человека. Основная сложность заключается в оценивании психофизиологических свойств, так как методы их оценивания носят, чаще всего, только качественный характер. Автором предлагается метод количественной оценки психофизиологических особенностей работника, как наиболее важный компонент человеческого фактора, влияющий на риск возникновения опасностей на производстве.

Предложен метод оценки риска воздействия опасностей с учетом влияния человеческого фактора. Оценка заключается в применении четырех основных параметров: вероятность воздействия опасности, вероятность попадания работника в зону воздействия опасности, состояние человека, при котором он перестает воспринимать опасность, характеризуется комплексом психофизиологических свойств личности человека, определяющее его безопасное взаимодействие в системе «человек-техническая система-производственная среда», тяжесть неблагоприятных последствий.

Метод оценки риска воздействия опасностей с учетом влияния человеческого фактора обеспечивают практическую применимость для руководителей производственных предприятий и служб охраны труда, способствуя повышению эффективности профилактических мероприятий и адаптации стратегий оценки профессионального риска к различным отраслям.

Ключевые слова: риск воздействия, человеческий фактор, количественная оценка риска, фактор возникновения опасности, время попадания в зону опасности.

Для цитирования: Зонова, Н. О. Проблемы учета человеческого фактора при количественной оценке рисков воздействия опасностей на производстве / Н. О. Зонова // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – №. 4 – С. 35–41. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_35.

Реализация производственных процессов и технологических операций на производстве неразрывно связана опасностями и не может быть абсолютно безопасной для человека, так как существует всегда вероятность возникновения ситуации, когда воздействие опасностей становится неотвратимой [1].

Человеческий фактор характеризует взаимоотношения между работниками и системами, в которых они трудятся. Пока существует в системе «человек – техническая система – производственная среда» основное слабое звено – человек, определяющий надежность и безопасность функционирования системы в целом, то не будет ни одной ситуации на производстве, в которой не присутствовал бы человеческий фактор, в той или иной степени.

Целью данной работы является выявить проблемы количественного учета влияния человеческого фактора на риск воздействия опасностей на производстве.

Исходя из того, что пока не существует один единственный универсальный метод оценки рисков, который подойдет для организации любой отрасли, в работе предлагается метод оценки, который позволит оценить риск воздействия опасностей с учетом влияния человеческого фактора в той организации, где существует данная необходимость [1].

В работе предлагается процедура оценки риска воздействия опасностей с учетом влияния человеческого фактора представляет собой процесс определения вероятности реализации тех или иных внештатных ситуаций во время выполнения работником обязанностей, заканчивающихся воздействием опасностей на организм работающего, так и тяжести неблагоприятных последствий [2].

Человек обладает неким комплексом компонентов, позволяющих ему жить и безопасно выполнять работу, в комплекс входят профессиональные, психофизиологические, физиологические, биомеханические, антропометрические и прочие свойства, которые определяются критериями функционального соответствия человека и техники, с учетом их изменения.

Перечислим основные проблемы, затрудняющие количественную оценку влияния человеческого фактора:

1. поведение сотрудников определяется сочетанием психофизиологических характеристик, профессиональных характеристик, организационных условий и внешних факторов, эти элементы взаимодействуют сложно и часто нелинейно.
2. сложность определить степень влияния человеческого фактора наряду с техническими и организационными причинами несчастных случаев, пока человек находится в системе «человек – техническая система – производственная среда» его влияние будет присутствовать в любом несчастном случае в той или иной степени;
3. субъективность и измеримость психологических переменных: мотивация, тревожность, стрессы, восприятие риска и культура безопасности и т.д. трудно измерить объективно;
4. неполнота и качество данных: ограниченный доступ к качественным данным по поведению, ошибкам и инцидентам и другие [3-9].

В работах таких авторов как О.В. Воробьевой, Я.С. Ворошилова, А. М. Завьялова, А.В. Аксенова, А.Л. Рыбалкиной и д.р. рассматриваются различные проблемы учета человеческого фактора [3-7]. Авторы рассматривают человеческий фактор с профессиональных, интеллектуальных, антропометрических и физиологических сторон в системе “человек - техническая система - производственная среда”, но количественная оценка психофизиологических компоненты человеческого фактора не учитывается в работах вышеуказанных авторов. В данной работе предлагается количественно учитывать психофизиологические особенности работника по следующим трем основным параметрам: восприятие информации (Ви), принятие решений (Пр) и выполнение действий работником (Вд). Их значимость подтверждается проведенным автором исследованиями [8-9]. Расчет данного показателя позволит учитывать человеческий фактор при оценке риска воздействия опасностей.

Рассмотрим формулу расчета риска воздействия опасностей с учетом влияния человеческого фактора:

$$R = (1 - ((1 - S_f) \cdot (1 - S_w) \cdot (1 - S_{hf}))) \cdot T \quad (1)$$

где S_f – вероятность воздействия опасности;

S_w – вероятность попадания работника в зону воздействия опасности;

S_{hf} – состояние человека, при котором он перестает воспринимать опасность, характеризуется комплексом психофизиологических свойств личности человека,

определяющее его безопасное взаимодействие в системе «человек-техническая система-производственная среда» - человеческий фактор;

Т – тяжесть неблагоприятных последствий.

Оценки вероятности воздействия опасности S_f предлагается в таблице 1.

Таблица 1

Значение вероятности опасности S_f

Уровень	Качественная характеристика вероятности опасностей		Вероятность	Балл
S_{f1}	Неправдоподобное	Опасность практически никогда не произойдет	Минимальная	0,2
S_{f2}	Маловероятное	Опасность случается редко	Умеренная	0,4
S_{f3}	Случайное	Вероятность опасности около 0,5	Существенная	0,6
S_{f4}	Вероятное	Скорее всего опасность произойдет	Значительная	0,8
S_{f5}	Частое	Опасность почти обязательно произойдет	Очень высокая	0,9

Для определения вероятности попадания работника в зону воздействия опасности S_w – время определяем в зависимости от графика работы (выборка от 1 до 24 часа) – делим время воздействия опасности ($T_{во}$) на время рабочей смены (T_c).

Для того, чтобы определить состояние человека, при котором он перестает воспринимать опасность S_{fh} необходимо экспертным методом оценить психофизиологические особенности работника с помощью интегрального критерия влияния человеческого фактора (далее ИКЧФ) по трем параметрам: V_n , P_p , V_d (таблица 2) [8-9].

Таблица 2

Шкала оценки параметра ИКЧФ

Балл	Уровень негативного влияния ЧФ	V_n	P_p	V_d
5	Низкий	Работник самостоятельно воспринимает и абсолютно правильно анализирует информацию при опасной ситуации.	Работник принимает абсолютно верное и безопасное решение.	Выполняет абсолютно верные действия в условиях сложившихся обстоятельств.
4	Ниже среднего	Работник самостоятельно воспринимает информацию в опасной ситуации. Не прогнозирует последствия.	Работник принимает верное, но не абсолютно безопасное решение.	Выполняет действия по инструкции с учетом существующего опыта в подобных ситуациях, без учета сложившихся обстоятельств.
3	Средний	Работник воспринимает информацию только на основе существующего опыта ошибок в подобных ситуациях.	Работник принимает в целом верное решение, но не учитывает сложившихся обстоятельств.	Выполняет действия по инструкции без учета опыта подобных ситуаций и сложившихся обстоятельств.
2	Выше среднего	Работник воспринимает информацию в опасной ситуации. Не знает, не замечает отклонений от стандартного техпроцесса.	Работник принимает частично верное решение, без учета сложившихся обстоятельств.	Выполняет действия по инструкции, частично, с нарушениями.
1	Высокий	Работник не воспринимает информацию в опасной ситуации. Не знает, не замечает отклонений от стандартного техпроцесса.	Работник принимает абсолютно неверное и опасное решение.	Нарушает инструкции. Действия могут привести к усугублению развития опасной ситуации.

Оценка ИКЧФ производится по формуле:

$$\text{ИКЧФ} = B_{\text{и}} \cdot d_1 + P_{\text{р}} \cdot d_2 + B_{\text{д}} \cdot d_3, \quad (2)$$

где $B_{\text{и}}$ – восприятие информации, $P_{\text{р}}$ – принятие решений, $B_{\text{д}}$ – выполнение действий, $d_1 = 0,29$, $d_2 = 0,37$, $d_3 = 0,34$ – весовые коэффициенты степени влияния параметров, эти величины определяются экспертным методом, в сумме составляют 1 [8-9].

Согласно полученным расчетным значениям ИКЧФ оценивается в диапазоне от 1 до 5. Исходя из расчета ИКЧФ по таблице 3 находим S_{hf} – состояние человека, при котором он перестает воспринимать опасность [8].

Таблица 3

Классификация влияния состояния человека S_{hf}

Значения ИКЧФ	Уровень S_{hf}	Степень негативного влияния ЧФ на вероятность риска воздействия
5	$S_{\text{hf}5} = 0,06$	Незначительная
4	$0,06 < S_{\text{hf}4} \leq 0,19$	Низкая
3	$0,19 < S_{\text{hf}3} \leq 0,36$	Умеренная
2	$0,36 < S_{\text{hf}2} \leq 0,59$	Высокая
1	$0,59 < S_{\text{hf}1} \leq 0,9$	Катастрофическая

Значение тяжести последствий T будем считать константой равной 1, то есть ущерб в любом случае произойдет, если существует вероятность реализации тех или иных внештатных ситуаций во время выполнения работником обязанностей, заканчивающихся воздействием опасностей на организм работающего.

На основании вышеперечисленного проводится расчет риска воздействия с учетом влияния человеческого фактора и определяется степень приемлемости человеческого фактора в зависимости от степени риска воздействия опасности, с помощью таблицы 4.

Таблица 4

Риск воздействия опасности с учетом негативного влияния человеческого фактора

Уровень R	Негативное влияние ЧФ	Характеристика влияния ЧФ на опасную ситуацию
	Степень	
$0,8 < R \leq 1$	Катастрофическая	Ошибки работников, в т. ч. серьезные, приведут к возникновению опасной ситуации. Вероятно получение тяжелого вреда здоровью (стойкая утрата проф. трудоспособности свыше 30%), в т. ч. полной утраты трудоспособности.
$0,6 < R \leq 0,8$	Высокая	Ошибки работников регулярны. Вероятно возникновение опасной ситуации и причинения вреда здоровью средней тяжести, в т. ч. с утратой проф. трудоспособности от 10 до 30 %.
$0,4 < R \leq 0,6$	Умеренная	Ошибки работников не регулярны, но могут привести к возникновению опасной ситуации и долговременной нетрудоспособности, в т. ч. утрате проф. трудоспособности менее 10 %.
$0,2 < R \leq 0,4$	Низкая	Возникновение опасной ситуации находится под контролем работников. В случае ее возникновения возможна временная нетрудоспособность.
$0 < R \leq 0,2$	Незначительная	Риск возникновения опасных ситуаций мало зависит от ЧФ. Какие-либо повреждения работников мало вероятны.

Исходя из того, что риск воздействия – это сочетание случайной возможности воздействия опасности на организм работающего и значимости (тяжести) последствий такого воздействия, то предложенный метод оценки риска воздействия опасностей с учетом влияния человеческого фактора позволяет учесть не только возможность (вероятность) и значимость (тяжесть) воздействия, но и влияние человеческого фактора на вероятность возникновения опасных событий [1].

На основе предложенного метода представляется возможным организация эффективного управления рисками возникновения опасных событий с учетом влияния человеческого фактора на вероятность реализации тех или иных внештатных ситуаций во время выполнения работником обязанностей, заканчивающихся воздействием опасностей на организм работающего, так как многолетний анализ показал, что системной причиной 70-80 % несчастных случаев на предприятиях является человеческий фактор [10]. Внедрение данного метода на основе количественного учета влияния человеческого фактора, с помощью оценивания психофизиологических составляющих, обеспечит наиболее эффективную организацию безопасных условий труда работников.

Список литературы

1. ГОСТ 12.0.230.5-2018. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы управления охраной труда. Методы оценки риска для обеспечения безопасности выполнения работ: межгосударственный стандарт / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=356792> (дата обращения 12.11.2025).
2. Е. В. Бакико, В. С. Сердюк, О.А. Цорина, А. М. Добренко, А. И. Фомин – DOI: 10.26631/issn.2072-6554 // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2021. – № 3. – С. 29–38.
3. Воробьева, О. В. Научное обоснование оценки и управления производственными рисками на угледобывающих предприятиях с учетом влияния человеческого фактора: специальность 05.26.01 «Охрана труда (по отраслям)»: автореф. дис. ... канд. техн. наук / О. В. Воробьева; Моск. гос. гор. ун-т. – Москва, 2009. – 21 с.
4. Ворошилов, Я. С. Модель компетентности работников в сфере безопасности труда / Я. С. Ворошилов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (51). – С. 25–28.

References

1. GOST 12.0.230.5-2018. Occupational Safety Standards System (OSSS). Occupational Safety Management Systems. Risk Assessment Methods for Ensuring Work Safety: Interstate Standard / Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (ISC). – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=356792> (accessed 12.11.2025).
2. E. V. Bakiko, V. S. Serdyuk, O. A. Tsorina, A. M. Dobrenko, A. I. Fomin – DOI: 10.26631/issn.2072-6554 // Bulletin of the Scientific Center for Occupational Safety in the Coal Industry. – 2021. – No. 3. – P. 29–38.
3. Vorobyova, O. V. Scientific substantiation of assessment and management of production risks at coal mining enterprises taking into account the influence of the human factor: specialty 05.26.01 "Occupational Safety (by industry)": author's abstract. dis. ... Cand. of Engineering Sciences / O. V. Vorobyova; Moscow state city University. - Moscow, 2009. - 21 p.
4. Voroshilov, Ya. S. Model of workers' competence in the field of occupational safety / Ya. S. Voroshilov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2020. - No. 2 (51). - P. 25-28.

5. **Завьялов, А. М.** Применение методологии когнитивного моделирования для оценки и анализа влияния человеческого фактора на безопасность движения поездов и безопасность производственных процессов на транспорте / А. М. Завьялов // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 3. – С. 80–84.

6. **Аксенов, В. А.** Модель оценки влияния человека на функционирование человеко-машинных систем / В. А. Аксенов, А. М. Завьялов // Известия Транссиба. – 2014. – № 1 (17). – С. 116–119.

7. **Рыбалкина, А. Л.** Человеческий фактор и психология безопасности: учеб. пособие / А. Л. Рыбалкина; Моск. гос. техн. ун-т гражданской авиации (МГТУ ГА). – Москва: ИД Академии Жуковского, 2018. – 83 с. – ISBN 978-5-907081-50-5.

8. Ковальковская, Н.О. Шкалирование параметров влияния человеческого фактора на уровень профессионального риска на объектах машиностроения / Н. О. Ковальковская, В. В. Кулешов, В. С. Сердюк, Е. В. Бакико. – DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-15-21 // Омский научный вестник. – 2020. – № 6 (174). – С. 15–21.

9. **Зонова, Н. О.** Оценка влияния человеческого фактора на уровень профессионального риска / Н. О. Зонова, Е. В. Бакико, В. В. Кулешов, В. С. Сердюк // Безопасность жизнедеятельности. – 2022. – № 12. – С. 3–12.

10. **Михайленко, Е. Д.** Совершенствование системы управления охраной труда на основе компетентностного подхода к управлению человеческими ресурсами: специальность 05.26.01 «Охрана труда (по отраслям)»: дис ... канд. техн. наук / Е. Д. Михайленко; АО «Науч. центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли». – Кемерово, 2022. – 194 с.

5. **Zavyalov, A. M.** Application of cognitive modeling methodology for assessing and analyzing the impact of the human factor on the safety of train traffic and the safety of production processes in transport / A. M. Zavyalov // Science and technology of transport. – 2014. – No. 3. – P. 80-84.

6. **Aksyonov, V. A.** Model for assessing human influence on the functioning of human-machine systems / V. A. Aksyonov, A. M. Zavyalov // Transsib News. – 2014. – No. 1 (17). – P. 116-119.

7. **Rybalkina, A. L.** Human factor and psychology of safety: textbook / A. L. Rybalkina; Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTU GA). – Moscow: Zhukovsky Academy Publishing House, 2018. – 83 p. – ISBN 978-5-907081-50-5.

8. **Kovalkovskaya, N. O.** Scaling of parameters of the influence of the human factor on the level of professional risk at mechanical engineering facilities / N. O. Kovalkovskaya, V. V. Kuleshov, V. S. Serdyuk, E. V. Bakiko. – DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-15-21 // Omsk Scientific Bulletin. – 2020. – No. 6 (174). – P. 15–21.

9. **Zonova, N. O.** Assessment of the influence of the human factor on the level of professional risk / N. O. Zonova, E. V. Bakiko, V. V. Kuleshov, V. S. Serdyuk // Life Safety. – 2022. – No. 12. – P. 3-12.

10. **Mikhailenko, E. D.** Improving the occupational safety management system based on a competence-based approach to human resource management: specialty 05.26.01 "Occupational safety (by industry)": dis... Candidate of Technical Sciences / E. D. Mikhailenko; JSC "Scientific Center of VostNII for Industrial and Environmental Safety in the mining industry". – Kemerovo, 2022. – 194 p.

N. O. Zonova

PROBLEMS OF ACCOUNTING FOR THE HUMAN FACTOR IN THE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF RISKS OF HAZARD EXPOSURE IN INDUSTRY

Abstract. The paper proposes a new method for assessing the risk of exposure to hazards, taking into account the influence of the human factor. The assessment involves the use of four main parameters: the probability of exposure to a hazard, the probability of an employee being exposed to a hazard, the state of a person in which they no longer perceive a hazard, which is characterized by a complex of psychophysiological properties of a person's personality that determines their safe interaction in the "human-technical system-production environment" system, and the severity of adverse consequences. The method of assessing the risk of exposure to hazards, taking into account the human factor, provides practical applicability for managers of industrial enterprises and occupational safety services, helping to improve the effectiveness of preventive measures and adapt occupational risk assessment strategies to different industries.

Keywords: exposure risk, human factor, risk quantification, hazard factor, time spent in the hazard zone.

For citation: Zonova, N. O. Problems of Accounting for the Human Factor in the Quantitative Assessment of Risks of Hazard Exposure in Industry / N. O. Zonova // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 35–41. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_35.

Сведения об авторах

Зонова Надежда Олеговна

Омский государственный технический университет (ОмГТУ),
кафедра «Промышленная экология и безопасность»,
старший преподаватель,
e-mail: kow-nad2009.92@mail.ru

Information about the authors

Zonova Nadegda Olegovna

Omsk State Technical University (OSTU),
Chair «Industrial Ecology and Safety»,
Senior Lecturer,
e-mail: kow-nad2009.92@mail.ru

*Е. Н. Каменская***ЗАЩИТА ЧЕЛОВЕКА ОТ КОММУНИКАЦИОННЫХ УГРОЗ**

Аннотация. Статья посвящена анализу коммуникационных угроз информационно-психологической безопасности человека в цифровой среде. Рассматриваются основные виды угроз, включая сетевую травлю, фишинг, обман и манипуляции сознанием. Особое внимание уделяется психологическим механизмам манипулятивного воздействия, таким как эксплуатация чувств вины, жалости, долга и страха. Автор описывает методы распознавания и противодействия манипуляциям, а также предлагает практические рекомендации по безопасному поведению в онлайн- и офлайн-коммуникациях. Статья подчёркивает важность развития медиаграмотности и критического мышления для защиты от деструктивного информационно-психологического воздействия.

Ключевые слова: коммуникационные угрозы, информационно-психологическая безопасность, сетевая травля, фишинг, манипуляция сознанием, психологическое воздействие, защита от манипуляций, медиаграмотность, цифровая среда, безопасное поведение в сети.

Для цитирования: Каменская, Е. Н. Защита человека от коммуникационных угроз / Е. Н. Каменская // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 42–46. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_42.

Коммуникационное негативное информационно-психологическое воздействие проявляется «в процессе негативного межличностного, а также группового общения» [2], когда присутствует обман, происходит манипулирование сознанием.

Коммуникационные угрозы информационно психологической безопасности проявляются в процессе взаимодействия между молодыми людьми, во время межличностной и групповой коммуникации в офлайн и (или) онлайн форматах, с применением вербальных и невербальных форм и использованием технических устройств. На рис. 1 представлены основные виды коммуникационных угроз [2].

Одним из видов коммуникационных угроз являются оскорбления и иные формы унижения человеческого достоинства, которые в сети могут проявляться в виде травли пользователя, включающего его систематические и продолжительные во времени преследования, сопровождающиеся унижением, оскорбительными высказываниями и угрозами в его адрес.

Сетевая травля отличается от травли при реальном взаимодействии вовлеченностью большого количества участников в деструктивный процесс; ощущением безнаказанности агрессора (находится на расстоянии от жертвы или может быть анонимным); беззащитностью жертвы (не может выстроить решительную защиту и оградить себя от сетевого буллинга анонимного врага); превышением границ давления и пределов допустимого на жертву из-за восприятия сетевого пользователя как игрового персонажа, отчужденного от личности человека; непрерывностью и длительностью деструктивного процесса травли (круглосуточно), поддержкой большой аудитории наблюдателей.

Методами сетевой травли являются публикации личных фото-, аудио- и видеоматериалов жертвы, использование в ее адрес насмешек, оскорблений, клеветы, угроз, взломы ее аккаунтов социальных сетей и электронной почты и публикации от ее имени негативных сообщений.

Способами противостояния травли являются: безопасное поведение в сетевом пространстве (взвешенность высказываний и реплик, написанных в Интернете, исключение

общения под влиянием эмоций), контролирование своих эмоций (не расстраивайтесь, не принимайте на свой счет оскорбления анонимных пользователей, уверенных в своей безнаказанности), игнорирование агрессивных высказываний, прекращение общения и привлечение администратора площадки для обеспечения безопасности общения на ней.



Рис. 1. Виды коммуникационных угроз

Основой рисков коммуникации в Интернет-пространстве являются иллюзии безнаказанности и анонимности пользователей, формируемые благодаря сетевым возможностям анонимизировать свою личность, что является провоцирующим фактором для демонстрации негативных сторон личности пользователя при сетевом общении. Пользователь позволяет себе необдуманные, грубые, оскорбительные высказывания и комментарии, которые в будущем могут негативно повлиять на его авторитет и его близких. Также в сети предлагается широкий круг общения с множеством новых контактов, и пользователь, проявляя безответственность и доверчивость, делится личной информацией, выкладывает фото и видеоматериалами себя, своих родных и близких в сеть, которые впоследствии могут использоваться злоумышленниками. Также информация пользователя, выложенная в цифровую среду, формирует его репутацию. Сетевая среда делает репутацию пользователя доступной множеству лиц.

К тому же нельзя забывать о фишинге (компьютерном или телефонном) или использовании поддельных писем и сайтов для получения конфиденциальных данных пользователя. Объектом фишинга является человек, поэтому безопасное поведение включает разумную осторожность, внимание и критическое отношение к таким сообщениям. Распространенной фишинг-атакой является звонок «службы безопасности банка» для получения финансовых средств со счета жертвы с помощью реквизитов банковской карты. Правилами безопасного поведения при фишинге: операции с банковской картой нужно выполнять только на официальном сайте или в офисе банка, исключить переходы по ссылкам и заполнения форм с указанием личных данных, не сообщать никому номер, пин-код банковской карты, логин и пароль от личного кабинета, не пересылать своим знакомым документы и банковские карты и не позволять их фотографировать, не хранить на компьютере финансовые данные и сканы документов. При фишинговых звонках необходимо с осторожностью относиться к звонкам с неизвестных номеров (не поддерживать разговор, не предоставлять личные данные, не перезванивать на пропущенные звонки), избегать специальных приложений определителей номера, иметь семейные пароли (известные только членам семьи), подключить отдельный телефонный номер для банковских приложений.

Еще одним видом коммуникационных угроз являются обман (дезинформация) и манипуляции сознанием. Обман представляет собой фальсификацию, применение недостоверных сведений, манипулирование фактами для введения в заблуждение. При этом для изложения недостоверных, лживых сведений применяется псевдонаучная манера и ссылки на фиктивные исследования или псевдо-экспертов.

Манипуляция является психологическим воздействием, оказываемым на психические состояния, установки и настроения человека или группы для получения запрограммированных реакций. Успешность межличностной манипуляции определяется получением нужного поведения объекта, который не замечает манипулирования и все происходящее оценивает, как естественный и закономерный процесс. Манипулятивная практика дает наивысший результат, когда за демонстрируемой прозрачностью и полной открытостью действий скрывается тщательно продуманная, спланированная и замаскированная схема достижения задуманного результата. Человек, как объект манипулирования, не считается манипулятором личностью, обладающей неприкосновенностью. Основным принципом манипулирования является утверждение, что цель оправдывает средства.

При манипулятивном влиянии может оказываться воздействие на эмоциональную сферу, которая в значительной степени определяет поведение человека, принятие им решений или совершение конкретных поступков. Чувства и эмоции наполняют жизнь человека, делают ее яркой и динамичной. В течение жизни человек постоянно подвергается эмоциональному воздействию (как положительному, так и отрицательному), что является необходимой частью его жизни и этот механизм может использоваться для манипулятивного (деструктивного) воздействия.

Негативные эмоции оказывают более сильное мотивирующее влияние, побуждают к действиям человека, чем положительные, так как они предупреждают об опасности, неприятности, проблеме и необходимости в реагировании и изменении ситуации.

Чувство вины часто используется при манипулятивном воздействии. Например, когда манипулятор пытается вызвать чувство вины у объекта, заставляя чувствовать себя виноватым и ответственным за реальные или мнимые неприятности в его жизни («Я очень рассчитывал, что ты одолжишь мне деньги. Ты же знаешь, как это для меня важно сейчас и у тебя есть деньги! Если ты не поможешь, то из-за тебя у меня будут еще большие неприятности!» или «Ты мог мне помочь, но не заступился за меня перед начальником, потому что, наверное, уже забыл, как я помог тебе в трудной ситуации. Из-за тебя у меня будут большие проблемы. Что будем делать?»). Для защиты от манипулятивного воздействия в подобной ситуации следует не забывать, что человек самостоятельно несет ответственность за свои решения и поступки, и поэтому необходимо сразу возратить ему эту ответственность, и не позволить переложить ее на вас («Мне жаль, что ты не смог рассчитать свои финансовые возможности...», «Мне жаль, но...»).

Чувство жалости также часто применяется при манипулятивном воздействии. Манипулятор пытается вызвать чувство жалости у объекта, презентует себя, как жертву обстоятельств, других людей, несправедливости и только вы сможете ему помочь: одолжить денег, подменить его на работе, выполнить его работу («Ты знаешь, что кроме тебя у меня нет друзей. Я никому не нужен. Хотя ты со мной общаешься, да и то, наверное, из жалости! Спасибо тебе! Займи мне, пожалуйста, денег до зарплаты. А то не за что поесть купить»). Для противодействия манипулятивному воздействию в подобной ситуации нужно понимать, что вашими ресурсами распоряжаются только вы (время, деньги) по своему усмотрению. И сами принимаете решение о готовности оказать помощь данному человеку. Также можно сказать о своих проблемах и трудностях в случае невозможности помочь.

Использование чувства долга при манипулятивном воздействии является эффективным средством в достижении цели манипулятора. В данной ситуации обращение направлено на ваши представления, что такое «хорошо», а что такое «плохо» («Настоящий мужик так не поступает»). Для противодействия такой манипуляции действенным способом является сообщение, что вы уважаете такую точку зрения, но не разделяете ее.

Чувство страха также неоднократно используется при манипулировании, поскольку эмоция страха является очень яркой и побуждающей к необдуманным действиям для избегания страшных последствий («Если ты уйдешь от меня, то меня уже ничто не остановит сделать...»). Для противодействия манипуляции лучше всего успокоиться. Сделать паузу для

рациональной оценки ситуации, принять решение и твердо действовать. Если манипулятор начинает вас шантажировать, то лучшим выходом является предание огласке предмета шантажа (вред будет меньше, чем от шантажиста) или обратиться за помощью в правоохранительные органы.

Для противодействия манипулированию необходимо не забывать основной принцип такого воздействия (вызвать эмоциональный ответ), который побудит вас к нужному для манипулятора действию. Поэтому следует себя повести не так, как ожидает манипулятор. Удивите его. Используйте свое умение говорить «нет» (нужно бороться со своей безотказностью). При принятии решения оцените, насколько оно соответствует вашим потребностям, интересам и ценностям.

Психологическое влияние на социальные группы выстраивается на убеждении, воздействии на эмоциональную сферу и подражании [1].

Убеждение, как способ психологического влияния, опирается на аргументацию (факты, ссылки на исследования, сравнение и обоснование преимуществ). Правильное применение аргументов является основой для распространения знаний, просвещения, разъяснения смысла происходящих изменений в обществе. При использовании манипулятивных приемов убеждение переходит в разряд деструктивных информационно-психологических воздействий на человека и группу (например, когда излагают ложную или только единственную точку зрения, выгодную для убеждающего и игнорируют другие подходы, факты, важные детали). Эффективно при манипулировании применяется эффект первичности (первая поступившая к человеку информации воспринимается им, как верная, надежная, чем последующая) как при межличностном взаимодействии, так и при массовой коммуникации.

Второй способ психологического влияния – внушение, применяемый как в межличностном, так и в групповом взаимодействии представлен психологическим воздействием на эмоциональную сферу (как в положительном, так и в отрицательном направлении). В данном случае осуществляется обращение к чувствам, игнорирование рационального, акцентирование внимания к нужным аспектам ситуации, что приводит к некритическому восприятию информации. Применение ярких, эмоционально окрашенных образов помогает влиять на поведение личности и группы. Например, манипулятивное воздействие посредством социальной сети для создания иллюзии, что посещение рекламируемого обучающего курса гарантирует человеку богатую и беззаботную жизнь.

Деструктивным информационно-психологическим воздействием на человека и группу является использование мнимой угрозы. Примеры использования данного приема на большие группы людей представлены в мировой политике и имеют катастрофические последствия. Например, заявление о наличии оружия массового поражения в Ираке в 2003 г. с демонстрацией пробирки К. Пауэллом на Совете Безопасности ООН, которое привело к вторжению в Ирак и катастрофическим последствиям для страны.

Третий способ психологического влияния – подражание, который заключается в заимствовании привычек, выражений, действий от симпатичных для нас людей, которых мы считаем «примером для подражания» и которые нас мотивируют. Подражание может быть положительным или отрицательным. В современном обществе проявления подражания можно наблюдать в виде «челленджи», когда известная личность предлагает повторить свое действие или поступок.

Примером деструктивного подражания является феномен Вертера, получивший название по имени персонажа романа И. В. Гёте «Страдания юного Вертера», который расстался с жизнью из-за несчастной любви. Популярность данного романа привела к волне самоубийств в Германии. Негативные проявления описанного феномена проявляются и в современном мире. Например, опасные виртуальные игры со смертью в социальных сетях, склоняющие подростков к самоубийству («Синий кит»).

Разнообразие механизмов воздействия на массовое сознание и проявление психологического влияния во всех областях жизни человека актуализирует проблему защиты от таких воздействий. Основными методами защиты будут: приобретение и накопление знаний психологических механизмов влияния; фиксирование и изучение проявлений таких воздействий в жизни; выработка привычки анализировать цели воздействия, сравнивать их с собственными целями, ценностями; осознание процесса принятия решения (желательно сделать перерыв, проверить факты, обдумать аргументы); соблюдение информационной гигиены; выработка привычки проверять информацию, используя различные источники.

Список литературы

1. Основы безопасности жизнедеятельности / Под ред. Ю. С. Шойгу / Ю. С. Шойгу, Е. Н. Байбарина, В. А. Зувев. – М., «Просвещение», 2024. – 256 с.
2. **Смирнов, А. А.** Формирование системы правового обеспечения информационно-психологической безопасности в Российской Федерации. Монография / А. А. Смирнов. – СПб.: Издательство «Русь», 2022. – 272 с.

References

1. Fundamentals of Life Safety / Ed. by Yu. S. Shoigu / Yu. S. Shoigu, E. N. Baibarina, V. A. Zuev. – M., "Education", 2024. – 256 p.
2. **Smirnov, A. A.** Formation of a system of legal support for information and psychological security in the Russian Federation. Monograph / A. A. Smirnov. – St. Petersburg: Rus Publishing House, 2022. – 272 p.

E. N. Kamenskaya

PROTECTION OF INDIVIDUALS FROM COMMUNICATION THREATS

Abstract. The article is devoted to the analysis of communication threats to the information and psychological security of individuals in the digital environment. The main types of threats are examined, including cyberbullying, phishing, deception, and consciousness manipulation. Special attention is paid to the psychological mechanisms of manipulative influence, such as the exploitation of feelings of guilt, pity, obligation, and fear. The author describes methods for recognizing and countering manipulation, as well as offers practical recommendations for safe behavior in online and offline communications. The article emphasizes the importance of developing media literacy and critical thinking for protection against destructive information and psychological influence.

Keywords: communication threats, information and psychological security, cyberbullying, phishing, consciousness manipulation, psychological influence, protection against manipulation, media literacy, digital environment, safe online behavior.

For citation: Kamenskaya, E. N. Protection of Individuals from Communication Threats / E. N. Kamenskaya // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 42–46. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_42.

Сведения об авторах

Каменская Елена Николаевна
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (ЮФУ),
Институт компьютерных технологий и
информационной безопасности,
кафедра «Психологии и безопасности
жизнедеятельности»,
д.п.н., профессор,
e-mail: kamenskyen@sfnedu.ru

Information about the authors

Kamenskaya Elena Nikolaevna
Southern Federal University (SFU),
Institute of Computer Technology and
Information Security,
Chair «Psychology and Life Safety»,
Doctor of Pedagogical Sciences, Professor,
e-mail: kamenskyen@sfnedu.ru

Е. Н. Каменская, Н. К. Дедюлина

КОНТЕНТНЫЕ УГРОЗЫ ИНФОРМАЦИОННО-ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Аннотация. В статье рассматриваются контентные угрозы информационно-психологической безопасности человека в условиях цифровизации общества. Авторы анализируют характерные особенности негативного информационно-психологического воздействия, классифицируют виды контентных угроз и критерии их вредоносности. Особое внимание уделяется фейковой информации, её эволюции, способам распространения и методам распознавания. Исследуется влияние деструктивного контента на традиционные духовно-нравственные ценности российского общества. На основе проведённого анализа предлагаются подходы к повышению устойчивости личности и социальных групп к контентным угрозам.

Ключевые слова: информационно-психологическая безопасность, контентные угрозы, фейковая информация, деструктивное воздействие, традиционные ценности, цифровизация, медиаграмотность, информационные риски.

Для цитирования: Каменская, Е. Н. Контентные угрозы информационно-психологической безопасности человека / Е. Н. Каменская, Н. К. Дедюлина // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 47–52. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_47.

Современный человек является активным социальным субъектом, взаимодействующим в информационном пространстве с другими людьми и нуждающийся в притоке информации из различных источников. Такими источниками являются личный опыт и общение, книги, СМИ, Интернет, социальные сети и др. При этом наблюдается увеличение доли информации, получаемой человеком из информационных источников, чем из личного опыта. Он становится более зависимым от информационных ресурсов и цифровых технологий.

Информационные риски представляют опасность сознанию и здоровью пользователей (опасный контент, неприемлемое поведение, ощущения безнаказанности, анонимности собственных действий в Интернете, вовлечение в деструктивное поведение, потребление недостоверной информации и т.д.).

Контентное негативное информационно-психологическое воздействие представляет собой влияние негативного контента, когда прямая коммуникация людьми не осуществляется (например, распространение порнографического контента, фото- и видеоматериалов насилия, террористических действий) [2].

Характерные черты угроз информационно-психологической безопасности [2]:

- 1) наличие латентного периода начала негативного информационно-психологического воздействия и сложности в его обнаружении, идентификации,
- 2) возможности изменения территориального масштаба воздействия,
- 3) сложный многоуровневый характер воздействия,
- 4) отсутствие точности в прогнозе эффективности влияния на человека, социальные группы, возможности сопротивления человека (социальной группы) благодаря имеющимся механизмам психологической защиты и навыкам, полученным в ходе обучения технологиям устойчивости к негативным информационно-психологическим воздействиям,

5) значительное снижение или даже блокирование негативного эффекта информационно-психологического воздействия в зависимости от информированности человека (социальной группы), негативное влияние на государственное управление.

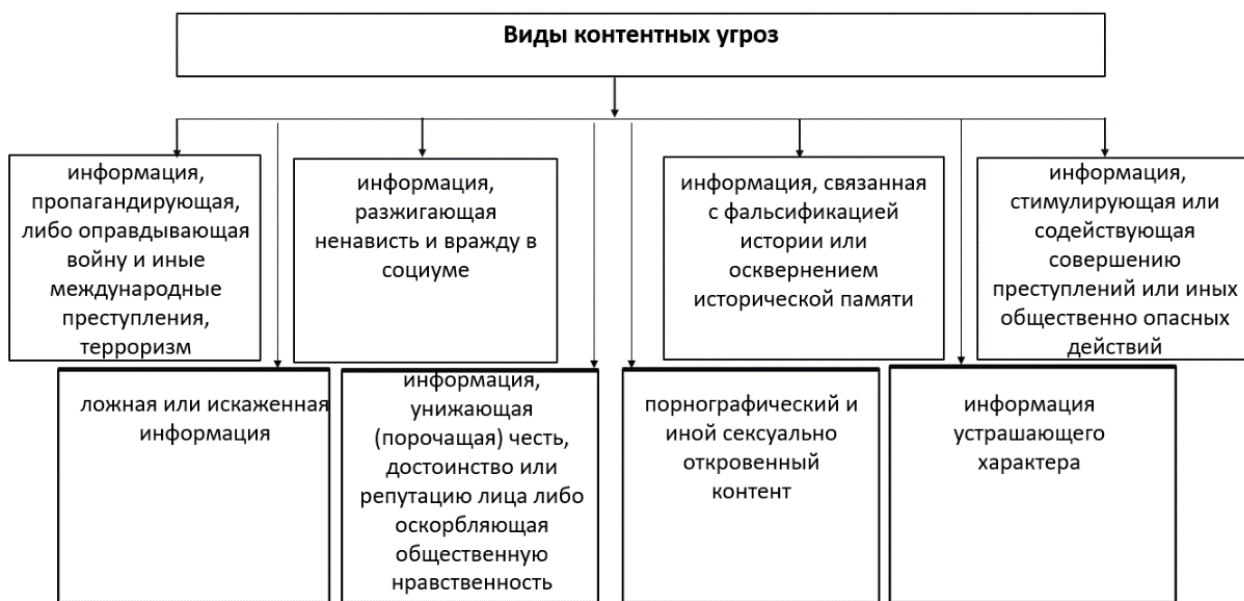


Рис. 1. Виды контентных угроз

Контентные угрозы включают виды информации с вредным, опасным негативным контентом, основной источник которых является массмедиа. Виды контентных угроз отражены на рис. 1, каждая, из которых, отличается специфическим механизмом деструктивного информационно-психологического воздействия, направленного на человека и социальную группу [2].

Критерии вредоносности контентных угроз (рис. 2).

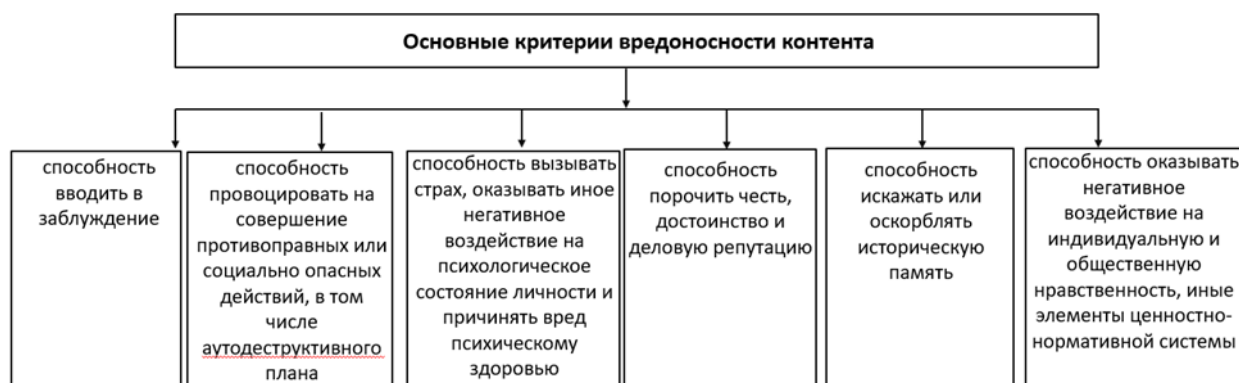


Рис. 2. Критерии вредоносности контента

В настоящее время обострилась проблема распространения фейков, передающих ложную информацию. Фейковый контент включает недостоверную текстовую информацию, фото-, видео-, аудиоматериалы, сайты и аккаунты в социальных сетях, содержащие недостоверные данные.

Одним из первых фейков в истории считается методика защиты страуса от опасности (спрятать голову в песок), стартовавший благодаря Плинию Старшему еще в Древнем Риме.

Приведем несколько примеров фейков. В 1990 г. свидетельства о терроризме в Кувейте, полученные от девочки Наиры, представляет собой первый спланированный,

постановочный политический фейк. Пример еще одного политического фейка, первого с распространением через сеть Интернет: утверждение о существовании плана Югославии «Подкова» по осуществлению этнических репрессий в Косово. Далее политический фейк в 2003 г. о существовании у Ирака оружия массового поражения с демонстрацией образцов химического оружия К. Пауэллом на Совете Безопасности ООН, который стал поводом вторжения американцев в Ирак. Примером неполитического фейка в 1998 г. является утверждение британского врача Э. Уэйкфилда о влиянии прививки от кори на развитие аутизма у детей, последствиями которого стали массовые отказы родителей вакцинировать детей и результатом вспышки кори (2006 и 2008), приведшие к гибели детей.

Эволюция средств массовой информации непосредственно связана с продвижением и отчасти фейковой информации, поскольку захватывающие сюжеты привлекают внимание людей и расширяют аудиторию издания или канала, увеличивают число просмотров. Фейки возродились с новой силой, благодаря появлению сети Интернет и его возможностей в быстром и легком распространении информации. Цели распространения фейков могут варьироваться от развлекательных до мошеннических и политических (рис. 3) [1].

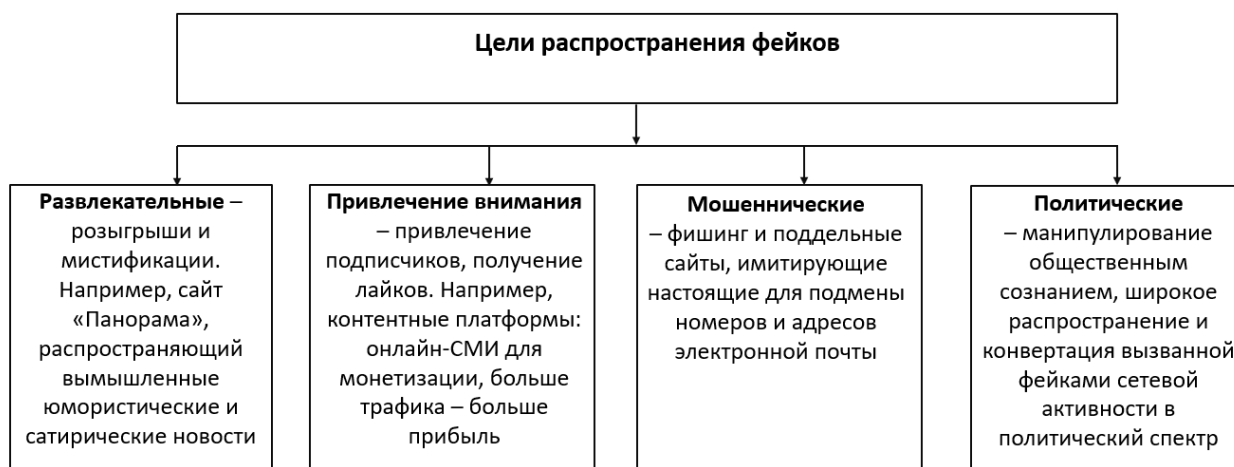


Рис. 3. Цели распространения фейков

Цифровизация информационных технологий стала причиной появления искусственно созданных видео- и аудиозаписей посредством нейросетей, абсолютно похожих на оригинал. Медиафайлы, включающие фото-, видео-, аудиоматериалы, полученные данным способом, или дипфейки, основанные на синтезе изображения или голоса человека с применением искусственного интеллекта часто применяется при финансовых мошеннических операциях.

Фейки в зависимости от уровня достоверности информации разделяются на следующие виды:

1. Фейки, основанные на реальных событиях, с добавлениями фальшивых деталей и обстоятельств, которые оказывают на пользователя эмоциональное давление и подводят к желательным выводам для распространения нужных идей, провокации споров, разжигания дискуссий.

2. Частичные фейки содержат сведения, не имеющие фактической значимости, которые включают фрагментарные достоверные сведения в сочетании с недостоверными. Такие сообщения используют для подмены новостной повестки, текущей обстановки, например, сообщения из жизни шоу-бизнеса.

3. Полные фейки содержат фальшивые, ложные сообщения. Такие сообщения не имеют информационной значимости, их целью является формирование отношения к теме фейка и провоцирование тиражирования обсуждения этой темы в социальных сетях и интернет-пространстве.

Распространение фейков охватывает большие аудитории благодаря использованию следующих инструментов [1]:

1. Задействование квази-СМИ или сайтов, изображающих интернет-СМИ, посвященные определенным темам, которые автоматически наполняются соответствующими тематике новостями, позаимствованными с похожих информационных ресурсов. Создается иллюзия работы реальных средств массовой информации, имитация посещаемости сайта и его продвижение в поисковых системах. При этом отсутствуют собственные авторские материалы площадки или демонстрируется их минимальное количество.

2. Применение одноразовых страниц или сайтов, имитирующих известные веб-сайты СМИ, онлайн платформы, сетевые издания. При этом учетные записи домена раскрывают данный сайт-фальшивку датой регистрации сайта и информацией о владельцах или сокрытие этой информации.

3. Имитирование известных средств массовой информации для постоянного распространения долгосрочных фейков с помощью псевдо-источников системы одноразовых страниц. При этом первый псевдо-источник помещается на иностранный хостинг для имитации достоверности.

Естественное распространение информации осуществляется при концентрической передаче данных из первоисточников и транслируется недолго, если не появляются новые подробности.

Искусственное распространение информации осуществляется по цепочке между связанными профилями, не охватывающими большие аудитории по отдельности, но вместе создающие иллюзию глобальности. В этом случае трансляция будет длительной.

Для распознавания фейкового текста необходимо:

- 1) отметить факты и соотнести заголовок и содержание информационного материала;
- 2) затем провести проверку источника (информационная история источника, количество опубликованных на ресурсе материалов, качество материалов, авторство);
- 3) найти подтверждающую информацию, используя независимые, достоверные источники, компетентные в данной сфере;
- 4) оценить скорость распространения данной информации (целенаправленное распространение информации чаще всего отличается ее высокой скоростью передачи);
- 5) проанализировать, какую психологическую реакцию вызывает сообщение, кому это может быть выгодно и в чем смысл сообщения (передача информации или эмоциональное воздействие),
- 6) изучить детально фотоматериалы, цитаты, ссылки на источники.

Для опознавания фейкового изображения необходимо:

- 1) исследовать его уникальность с помощью сервиса поиска по картинкам;
- 2) найденные изображения проанализировать (оценить похожие, проверить даты публикации дубликатов);
- 3) проверить метаданные картинки (дата, время создания и последней обработки, данные геолокации), применив стандартные средства Windows.

Внешнее разрушительное контентное информационно-психологическое воздействие приводит к идеологическому подрыву традиционных российских духовно-нравственных ценностей, усугублению демографической ситуации в стране, культивированию деструктивной идеологии, «включая культивирование эгоизма, вседозволенности, безнравственности, отрицание идеалов патриотизма, служения Отечеству, естественного продолжения жизни, ценности крепкой семьи, брака, многодетности, созидательного труда, позитивного вклада России в мировую историю и культуру, разрушение традиционной семьи с помощью пропаганды нетрадиционных сексуальных отношений» [3].



Рис. 4. Традиционные ценности

В современном российском обществе одним из важных вопросов на текущий момент является сохранение традиционных ценностей (рис. 4), представляющих собой моральные принципы, закладывающие основы мировоззрения россиян, которые передаются из поколения в поколение, и на базе которых формируется общероссийская гражданская идентичность и единое культурное пространство страны.

Список литературы

1. Основы безопасности жизнедеятельности / Под ред. Ю. С. Шойгу / Ю. С. Шойгу, Е. Н. Байбарина, В. А. Зув. – М., «Просвещение», 2024. – 256 с.
2. Смирнов, А. А. Формирование системы правового обеспечения информационно-психологической безопасности в Российской Федерации. Монография / А. А. Смирнов. – СПб.: Издательство «Русь», 2022. – 272 с.
3. Указ Президента РФ от 9 ноября 2022 г. № 809 “Об утверждении Основ государственной политики по сохранению и укреплению традиционных российских духовно-нравственных ценностей”.

References

1. Fundamentals of Life Safety / Ed. by Yu. S. Shoigu / Yu. S. Shoigu, E. N. Baibarina, V. A. Zuev. – M., "Education", 2024. – 256 p.
2. Smirnov, A. A. Formation of a system of legal support for information and psychological security in the Russian Federation. Monograph / A. A. Smirnov. – St. Petersburg: Rus Publishing House, 2022. – 272 p.
3. Decree of the President of the Russian Federation of November 9, 2022 No. 809 “On approval of the Fundamentals of State Policy for the Preservation and Strengthening of Traditional Russian Spiritual and Moral Values”.

E. N. Kamenskaya, N. K. Dedyulina

CONTENT THREATS TO INFORMATION AND PSYCHOLOGICAL SECURITY OF THE INDIVIDUAL

Abstract. The article examines content threats to the information and psychological security of individuals in the context of societal digitalization. The authors analyze the characteristic features of negative information and psychological influence, classify types of content threats, and define criteria for their maliciousness. Special attention is paid to fake information, its evolution, dissemination methods, and recognition techniques. The influence of destructive content on the traditional spiritual and moral

values of Russian society is investigated. Based on the conducted analysis, approaches to enhancing the resilience of individuals and social groups to content threats are proposed.

Keywords: information and psychological security, content threats, fake information, destructive influence, traditional values, digitalization, media literacy, information risks.

For citation: Kamenskaya, E. N. Content Threats to Information and Psychological Security of the Individual / E. N. Kamenskaya, N. K. Dedyulina// Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 47–52. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_47.

Сведения об авторах

Каменская Елена Николаевна
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (ЮФУ),
Институт компьютерных технологий и информационной безопасности,
кафедра «Психологии и безопасности жизнедеятельности»,
д.п.н., профессор,
e-mail: kamenskyaen@sfedu.ru

Дедюлина Нина Константиновна
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (ЮФУ),
Институт компьютерных технологий и информационной безопасности,
Студент

Information about the authors

Kamenskaya Elena Nikolaevna
Southern Federal University (SFU),
Institute of Computer Technology and Information Security,
Chair «Psychology and Life Safety»,
Doctor of Pedagogical Sciences, Professor,
e-mail: kamenskyaen@sfedu.ru

Dedyulina Nina Konstantinovna
Southern Federal University(SFU),
Institute of Computer Technology and Information Security,
Student

В. А. Крутова, Д. С. Фролова

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ШУМА В СИСТЕМЕ ПОМЕЩЕНИЙ ВАГОНА-ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПОЕЗДА

Аннотация. В ходе экспериментов, проведённых в замкнутых пространствах вагонов-электростанций, были выявлены неблагоприятные условия труда операторов [1-5]. Наиболее критическими оказались превышения виброакустических показателей. Верификация результатов, проведенная с применением инструментария теории неопределенностей, позволила разделить систематические и случайные погрешности, что крайне необходимо для оценки достоверности санитарно-гигиенического контроля [6-7]. Особую роль в данном процессе сыграла идентификация источников локальных акустических аномалий, что переводит задачу из чисто измерительной в инженерно-диагностическую плоскость. На основании полученных результатов измерений проведена обработка экспериментальных данных и выявлен доверительный интервал. В статье приведен пример расчета для одного помещения, так расчеты для остальных помещений выполнены таким же способом и в связи с громоздкостью не представлены. Представленная работа не только подтверждает корректность выполненных измерений, но и задает вектор для совершенствования методов обеспечения безопасности труда, объединяя метрологическую точность с прикладными инженерными решениями по защите персонала от вредных производственных факторов.

Ключевые слова: шумовые характеристики, вагоны-электростанции, восстановительные поезда, экспериментальные исследования, система помещений, шумомер, верификация, уровни звука.

Для цитирования: Крутова, В. А. Верификация результатов измерений шума в системе помещений вагона-электростанции восстановительного поезда / В. А. Крутова, Д. С. Фролова // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 53–59. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_53.

Экспериментальные исследования шумовых характеристик в помещениях вагона-электростанции восстановительного поезда проводились с целью оценки соответствия фактических уровней звукового давления установленным санитарно-гигиеническим нормативам и эксплуатационным требованиям. Исследования проводились согласно стандартной методики измерений, однако, любое измерение невозможно провести с абсолютным отсутствием погрешности, поэтому полученные данные подлежат тщательной верификации, поскольку от их достоверности зависят как состояние здоровья персонала, так и исправность чувствительного оборудования.

Первым этапом верификации стала проверка метрологического обеспечения измерительного оборудования. Шумомер первого класса точности прошел поверку и калибровку, которая выполнялась до и после каждой серии замеров с использованием эталонного источника звука, а отклонения не превысили 0,3 дБ, что находится в пределах допустимой погрешности. Микрофон устанавливался на высоте 1,5 метра от пола — в зоне нахождения головы оператора, с ориентацией под углом 70 градусов к источнику шума, как предписывает методика измерений. Уровни звукового давления получены методом прямых

измерений. Поэтому одной из главных задач экспериментальных исследований является оценка точности и достоверности измерений.

При измерении шумовых характеристик в вагоне-электростанции было выбрано четыре контрольные точки измерений. Каждой точке соответствует свой ряд измерения (таблица 1) по расчетным точкам. Оценка показателя эквивалентного общего уровня шума производилась в дизельном отделении - точка 1, на рабочем месте машиниста вагона-электростанции – точка 2, купе кухня-салон – точка 3, купе для отдыха – точка 4. Помещения были выбраны не случайно: они отражают как зоны с максимальным уровнем шумового воздействия (дизельное отделение), так и пространства, где требования к акустическому комфорту наиболее высоки (зоны отдыха). Каждая из четырёх контрольных точек, закреплённых за конкретным помещением, обеспечивает сбор данных с учётом пространственной неравномерности звукового поля, неизбежной в условиях ограниченного объёма вагона. Многократные повторные замеры в каждой точке снижают влияние случайных факторов, а последующая статистическая обработка позволяет с высокой достоверностью определить эквивалентные уровни звукового давления как в октавных полосах частот, так и по линейной характеристике. В таблице 1 приведен перечень показателей, используемых в процессе верификации.

Таблица 1

Перечень показателей, используемых в процессе верификации

Показатели	Эквивалентный уровень звукового давления, дБ			
Диапазон измерения	80 ... 100 дБ			
Метод измерения	Метод прямых измерений с использованием СИ утвержденного типа.			
Условия окружающей среды при которых испытания признаются валидными	Температура от +5°C до +40°C и влажность не более 80%			
Номер точки измерений	1	2	3	4
Место измерения	Дизельное отделение	Рабочее место машиниста	Купе кухня-салон для отдыха	Купе для отдыха

Алгоритм верификации заключался в следующем. Для вычисления уровня звукового давления (далее – УЗД) $L_{p,eq,m}$ на m -м интервале применяем выражение:

$$L_{p,eq,m} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \cdot L_{p,eq,m,i}} \right) \quad (1)$$

где $L_{p,eq,m}$ – уровень звукового давления; $L_{p,eq,m,i}$ – результаты единичных измерений уровня звукового давления в данном временном отрезке; N – количество выполненных измерений; m – номер интервала; i – номер единичного измерения в данном интервале.

Уровень звукового давления за весь период оценки T_0 определяется по формуле (2) с учетом длительности каждого интервала T_m :

$$L_{p,eq,T_0} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{m=1}^m \frac{T_m}{T_0} 10^{0,1 \cdot L_{p,eq,m}} \right) \quad (2)$$

Полученные в ходе измерений данные систематизированы по временным отрезкам и сведены в таблицы, где для каждого интервала указаны значения единичных замеров, их количество, а также рассчитанный по формуле (1) эквивалентный уровень звукового давления. Результаты прямых единичных измерений УЗД для каждого интервала в каждой расчетной точке приведены в таблице 2. В качестве иллюстрации приводим данные измерений, полученные в первых двух помещениях в течении 8 временных отрезков.

Таблица 2

Результаты прямых единичных измерений УЗД на данном временном отрезке

Номер интервала	Уровень звукового давления, дБ					
	дизельное отделение (точка 1)			Рабочее место машиниста (точка 2)		
1	100,2	101,5	100,7	94,4	94,8	95,6
2	101,1	100,6	100,9	95,1	94,7	95,1
3	100,7	100,0	101,3	94,8	95,3	95,3
4	99,8	99,5	100,0	96,2	96,4	95,7
5	99,3	99,8	99,0	96,3	96,0	95,1
6	98,8	99,2	98,6	95,4	95,7	94,9
7	99,5	99,1	98,9	95,6	96,8	96,2
8	98,3	98,6	99,2	95,5	96,1	94,9

Полученные значения уровня звукового давления демонстрируют, что в течение всего периода оценки, равного 480 минутам, средний эквивалентный уровень шума в дизельном помещении (точка 1) оставался крайне высоким. Данный показатель практически не отклоняется от значений отдельных восьми временных отрезков, которые колебались в диапазоне от 98,2 до 100,7 дБА, что говорит о стабильности работы дизельных установок в течение смены, что характерно для штатного режима эксплуатации. Разница между крайними точками составляет всего 2,5 дБА, что подтверждает гомогенность акустической обстановки.

На следующем этапе для каждого временного промежутка и каждой точки проводился расчет итогового уровня звукового давления, в которой использовалось временное взвешивание T_0 с коэффициентом 60/480 для каждой точки измерения (таблица 3).

Таблица 3

Результаты расчетов средней величины в определенном временном отрезке на примере дизельного отделения (точка 1)

Номер интервала	$10 \cdot \lg \left(\sum_{m=1}^m \frac{T_m}{T_0} 10^{0,1 \cdot L_{p,eq,m}} \right)$	Итоговое значение, дБА
$L_{p,eq,1}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 100,2} + 10^{0,1 \cdot 101,5} + 10^{0,1 \cdot 100,7}}{3} \right)$	100,83
$L_{p,eq,2}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 101,1} + 10^{0,1 \cdot 100,6} + 10^{0,1 \cdot 100,9}}{3} \right)$	100,87
$L_{p,eq,3}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 100,7} + 10^{0,1 \cdot 100,0} + 10^{0,1 \cdot 101,3}}{3} \right)$	100,70
$L_{p,eq,4}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 99,8} + 10^{0,1 \cdot 99,5} + 10^{0,1 \cdot 100,0}}{3} \right)$	99,77
$L_{p,eq,5}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 99,3} + 10^{0,1 \cdot 99,8} + 10^{0,1 \cdot 99,0}}{3} \right)$	99,38
$L_{p,eq,6}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 98,8} + 10^{0,1 \cdot 99,2} + 10^{0,1 \cdot 98,6}}{3} \right)$	98,87
$L_{p,eq,7}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 99,5} + 10^{0,1 \cdot 99,1} + 10^{0,1 \cdot 98,9}}{3} \right)$	99,17
$L_{p,eq,8}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 98,3} + 10^{0,1 \cdot 98,6} + 10^{0,1 \cdot 99,2}}{3} \right)$	98,72

Особого внимания заслуживает методика расчета итогового уровня, что позволяет корректно учитывать вклад каждого 60-минутного интервала в общую 480-минутную

экспозицию. В данном случае все отрезки имеют одинаковую длительность, поэтому их вклад равнозначен, однако итоговая формула показывает, что эквивалентный уровень практически совпадает со средним арифметическим по всем отрезкам.

$$L_{p,eq,T_0} = 10 \lg(0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 100,83} + 0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 100,87} + 0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 100,70} + 0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 99,77} + 0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 99,38} + 0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 98,87} + 0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 99,17} + 0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 98,72}) = 99,87 \approx 100 \text{ дБА.}$$

При условии, что исходные параметры, от которых зависит эквивалентный уровень, не связаны между собой корреляцией, суммарная стандартная неопределённость u_c вычисляется по формуле (3) с использованием коэффициентов чувствительности и стандартных неопределённостей входных величин по формуле [9] Формула представляет собой классическое представление закона распространения неопределённостей:

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2}, \quad (3)$$

где $u_b = 0,40$ дБ – стандартная неопределённость инструментальной составляющей, принятая как $\frac{0,7}{\sqrt{3}}$; u_a – стандартная неопределённость типа А, рассчитывается по формуле [10]:

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_{p,eq,n} - \bar{L}_{p,eq})^2}{n \cdot (n - 1)}}, \quad (4)$$

где $\bar{L}_{p,eq,n}$ – УЗД для n -го выборочного измерения при выполнении заданной трудовой функции; выборочных измерений [7], т. е. $\bar{L}_{p,eq} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_{p,eq,n}$.

Расширенная неопределённость U находится как:

$$U = k \cdot u_c. \quad (5)$$

где k – коэффициент охвата, который выбирается согласно ГОСТ 34100.3-2017 [8] для уровня доверия 95 %.

Результаты расчетов для дизельного отделения (точка 1):

1. Стандартная неопределённость типа А, рассчитанная по стандартной методике, составляет:

$$u_a = \sqrt{\frac{(100,83-99,87)^2 + (100,87-99,87)^2 + (100,70-99,87)^2 + (99,77-99,87)^2 + (99,38-99,87)^2 + (98,87-99,87)^2 + (99,17-99,87)^2 + (98,72-99,87)^2}{24 \cdot (24-1)}} = 0,036.$$

2. Суммарная стандартная неопределённость (вклад систематического лабораторного смещения признается незначительным):

$$u_c = \sqrt{0,036^2 + 0,40^2} = 0,40.$$

3. В соответствии с ГОСТ 34100.3 [8] число степеней свободы принимается равным бесконечности, а коэффициент охвата $k = 1,96$ при доверительной вероятности $P = 95$ %.

Расширенная неопределённость, после округления до разряда допустимой погрешности:

$$U = 1,96 \cdot 0,40 = 0,78 \approx 0,8 \text{ дБ.}$$

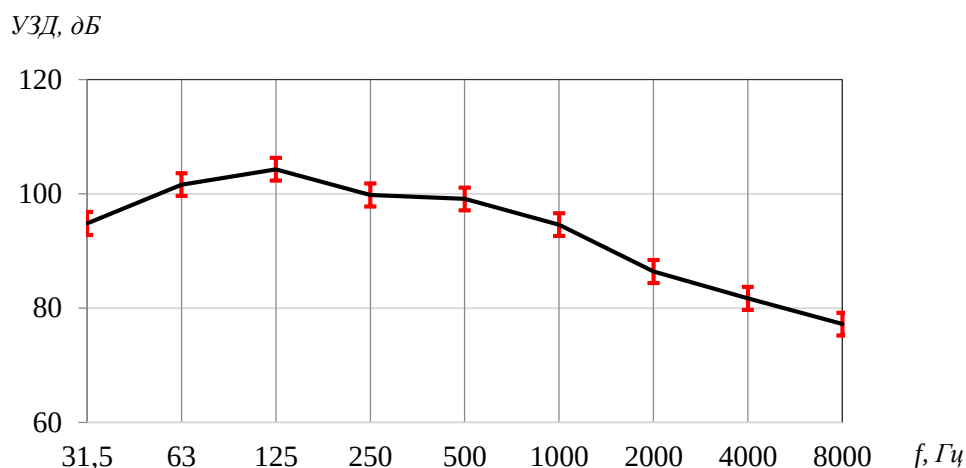


Рис. 1 Диапазон изменения уровней звукового давления с отображением расширенной погрешности в дизельном отделении

Заключение.

Измерения эквивалентного суммарного уровня звукового давления в диапазоне 80–100 дБ (по линейной характеристике шумомера) были успешно верифицированы на точность. Последующий анализ не выявил необходимости в корректирующих действиях. Предложенная методика статистической обработки экспериментальных данных позволяет объективно оценивать отклонения как реально зафиксированных значений, так и результатов математического моделирования. Полученные результаты могут быть распространены на другие типы подвижного состава со схожими условиями генерации шума.

Список литературы

1. **Фролова, Д. С.** Теоретическая оценка акустических характеристик в вагоне-электростанции восстановительного поезда / Д. С. Фролова, В. А. Крутова // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4. – С. 111–115. – ISSN 1818-5509.
2. Способы снижения шума и вибраций при проектировании, производстве и эксплуатации железнодорожного подвижного состава / И. В. Колесников, С. Ф. Подуст, С. С. Подуст, А. Н. Чукарин. – Москва : Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук (ВИНИТИ РАН), 2015. – 216 с. – EDN WOBVJH.
3. **Подуст, С. Ф.** Закономерности формирования спектров шума, создаваемых воздушной составляющей, на рабочих местах локомотивных бригад электропоездов / С. Ф. Подуст // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 1 (57). – С. 40–46. – ISSN 0201-727X.
4. **Яицков, И. А.** Проблемы негативного воздействия производственного шума на

References

1. **Frolova, D. S.** Theoretical assessment of acoustic characteristics in the power station car of the recovery train / D. S. Frolova, V. A. Krutova // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2022. - No. 4. - P. 111-115. - ISSN 1818-5509.
2. Methods for reducing noise and vibration during the design, production and operation of railway rolling stock / I. V. Kolesnikov, S. F. Podust, S. S. Podust, A. N. Chukarin. - Moscow: All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences (VINITI RAS), 2015. - 216 p. - EDN WOBVJH.
3. **Podust, S. F.** Regularities of formation of noise spectra created by the air component at the workplaces of locomotive crews of electric locomotives / S. F. Podust // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2015. - No. 1 (57). - P. 40-46. - ISSN 0201-727X.
4. **Yaitskov, I. A.** Problems of the negative impact of industrial noise on railway workers /

работников железнодорожного транспорта / И. А. Яицков, И. Г. Переверзев, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4. – С. 112-114. – EDN YURPTF.

5. **Яицков, И. А.** Теоретическое исследование воздушной составляющей шума силовых установок транспортных машин / И. А. Яицков // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 31. – EDN YSAHJH.

6. **Фролова, Д. С.** Анализ результатов экспериментальных измерений вибрации и внутреннего шума вагона-электростанции восстановительного поезда, возникающих при работе дизель-генераторных установок / Д. С. Фролова // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 2. – С. 34–41. – DOI 10.24000/0409-2961-2024-2-34-41.

7. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утверждены постановлением главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2. – Текст: электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?ysclid=lu9qp1pvc2927493028>.

8. **Иванов, Н. И.** Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом : учебник / Н. И. Иванов. – Москва : Логос, 2013. – 432 с. – ISBN 978-5-98704-659-3.

9. ГОСТ Р ИСО 9612-2013. Акустика. Измерения шума для оценки его воздействия на человека. Метод измерений на рабочих местах: введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 05 декабря 2013 г. № 2180-ст. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 67 с.

10. ГОСТ 34100.3-2017. Неопределенность измерения. Часть 3: Руководство по выражению неопределенности измерения: межгосударственный стандарт: издание официальное: введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 сентября 2018 г. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12

I. A. Yaitskov, I. G. Pereverzev, T. A. Finochenko // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2018. - No. 4. - P. 112-114. - EDN YURPTF.

5. **Yaitskov, I. A.** Theoretical study of the air component of noise of power plants of transport vehicles / I. A. Yaitskov // Internet journal Naukovedenie. - 2017. - Vol. 9, No. 6. - P. 31. - EDN YSAHJH.

6. **Frolova, D. S.** Analysis of the results of experimental measurements of vibration and internal noise of the power station car of the recovery train arising during the operation of diesel generator sets / D. S. Frolova // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. - 2024. - No. 2. - P. 34-41. - DOI 10.24000/0409-2961-2024-2-34-41.

7. SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans: approved by the Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021, No. 2. - Text: electronic. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?ysclid=lu9qp1pvc2927493028>.

8. **Ivanov, N. I.** Engineering acoustics. Theory and practice of noise control: textbook / N. I. Ivanov. - Moscow: Logos, 2013. - 432 p. - ISBN 978-5-98704-659-3.

9. GOST R ISO 9612-2013. Acoustics. Noise measurements for assessing its impact on humans. Method of measurements at workplaces: put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 5, 2013, No. 2180-st. – Moscow: Standartinform, 2014. – 67 p.

10. GOST 34100.3-2017. Measurement uncertainty. Part 3: Guidelines for the Expression of Measurement Uncertainty: Interstate standard: official publication: introduced as the national standard of the Russian Federation on September 1, 2018 by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated September 12, 2017 No. 1065-art. Moscow:

сентября 2017 г. № 1065-ст. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 104 с. – Текст: электронный. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293743/4293743700.pdf> (дата обращения: 16.11.2024).

Standartinform, 2018. 104 p. – Text: electronic. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293743/4293743700.pdf> (date of access: 11/16/2024).

V. A. Krutova, D. S. Frolova

VERIFICATION OF NOISE MEASUREMENT RESULTS IN THE SYSTEM OF THE RECOVERY TRAIN'S CAR-ELECTRIC STATION

Abstract. In the course of experiments conducted in confined spaces of power plant wagons, unfavorable working conditions of operators were revealed [1-5]. The most critical were the exceedances of vibroacoustic parameters. Verification of the results, carried out using the tools of uncertainty theory, made it possible to separate systematic and random errors, which is extremely necessary to assess the reliability of sanitary and hygienic control [6-7]. A special role in this process was played by the identification of sources of local acoustic anomalies, which translates the task from a purely measuring to an engineering diagnostic plane. Based on the obtained measurement results, experimental data were processed and a confidence interval was determined. The article provides an example of a calculation for one room, as calculations for other rooms are performed in the same way and are not presented due to the bulkiness. The presented work not only confirms the correctness of the measurements performed, but also sets a vector for improving occupational safety methods, combining metrological accuracy with applied engineering solutions to protect personnel from harmful industrial factors.

Keywords: noise characteristics, power plant cars, recovery trains, experimental studies, room system, sound level meter, verification, sound levels.

For citation: Krutova, V. A. Verification of Noise Measurement Results in the System of the Recovery Train's Car-Electric Station / V. A. Krutova, D. S. Frolova // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 53–59. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_53.

Сведения об авторах

Крутова Вероника Александровна

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, кафедра «Механика деформируемого твердого тела», доктор технических наук, профессор, e-mail: krutova_va@voenmeh.ru

Фролова Дарья Сергеевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Проектирование и технология производства машин», кандидат технических наук, доцент, e-mail: frolovads@rgups.ru

Information about the authors

Krutova Veronika Aleksandrovna

Baltic State Technical University VOENMEH named after D.F. Ustinov, Chair «Mechanics of a Deformable Solid», Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: krutova_va@voenmeh.ru

Frolova Darya Sergeevna

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Machine Design and Production Technology», Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: frolovads@rgups.ru

А. Е. Набоков, С. М. Коробов, Т. А. Финоченко

ФОНОВЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ ШУМ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОМЕЩЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ

Аннотация. Учет акустических характеристик производственных помещений является важным аспектом при разработке мер по снижению шумового воздействия. В статье рассматривается проблема фонового акустического шума в производственных помещениях – его источники, характеристики, влияние на здоровье и работоспособность персонала, а также методы контроля и снижения уровня шума.

Ключевые слова: фоновый акустический шум, производственное помещение, уровень звукового давления, охрана труда, шумозащита.

Для цитирования: Набоков, А. Е. Фоновый акустический шум производственного помещения при эксплуатации металлообрабатывающих станков / А. Е. Набоков, С. М. Коробов, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 60–66. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_60.

Введение. Фоновый акустический шум на производственных площадках, оснащенных металлообрабатывающими станками, представляет собой сложный и динамичный комплекс звуковых явлений. Его формирование обусловлено одновременной работой множества источников, таких как станки и агрегаты, а также вспомогательное оборудование – системы вентиляции, компрессоры, транспортные механизмы. Интегральное воздействие этих источников формирует акустическую картину, характеризующуюся широким спектром частот и непостоянством уровней звукового давления.

Специфика металлообработки, включающая в себя резание, шлифовку, деформацию металла, оказывает существенное влияние на структуру фонового шума. Высокоскоростная работа режущего инструмента, соударения деталей, вибрации конструкций станков – все это генерирует интенсивные звуковые колебания в широком диапазоне частот, зачастую с выраженными пиками на определенных резонансных частотах. Характерным элементом являются также аэродинамические шумы, возникающие при работе систем охлаждения и удаления стружки.

Общий уровень шума складывается из уровней прямого звука, исходящего от источников, и звуковых волн, отраженных от других поверхностей. В замкнутом пространстве ослабление звука происходит постепенно, по мере его столкновения с различными препятствиями и потерей энергии при взаимодействии. Усугубляет ситуацию отражение звуковых волн от жестких поверхностей цеха – стен, пола, потолка, оборудования. Многократные отражения создают эффект реверберации, увеличивая продолжительность звучания и приводя к пространственному рассеиванию звуковой энергии. В результате, даже относительно небольшие по мощности источники шума могут создавать значительный уровень общего фонового шума. Для уменьшения реверберации применяются звукопоглощающие материалы, которые устанавливаются на ограждающих конструкциях [1– 3].

В ходе теоретического расчета и анализа шумовых характеристик требуется разделение акустического пространства на ближнюю и дальнюю области. Ближайшая зона включает прямой звук и не зависит от размеров источника, а дальняя зона определяется граничными условиями, возникающими, когда расстояние от расчетной точки (r) до источника превышает

наибольший размер источника (l_{max}). Акустическое поле в замкнутом объеме рассматривается как диффузное, предполагающее его однородность. Характеристики диффузности этого акустического поля можно представить следующим образом [4, 5]:

$$f_{диф} = \frac{500}{\sqrt[3]{V}} \quad (1)$$

где V – объем производственного помещения, м³.

На основе уровней прямого и отраженного звуков и учитывая диффузность звукового поля, интенсивность звука на рабочем месте рассчитывается по формуле:

$$I = I_{пр} + I_{отр} \quad (2)$$

где $I_{пр}$ и $I_{отр}$ – интенсивность прямого и отраженного звука, Вт/м², соответственно.

Интенсивность прямого звука от работающего оборудования, может быть оценена с помощью следующего выражения:

$$I_{пр} = \frac{\chi \cdot W \cdot \varphi}{2\pi r^2} \quad (3)$$

где W – мощность источника звука, Вт;

χ – коэффициент, учитывающий особенности ближнего звукового поля;

φ – коэффициент, отражающий направленность излучения источника;

r – расстояние от источника до расчетной точки, м.

Коэффициенты, учитывающие влияния ближнего звукового поля (χ) и отражающие нарушение диффузности акустического поля (φ), определяются по графикам, приведенным на рисунках 1 и 2 [4, 6].

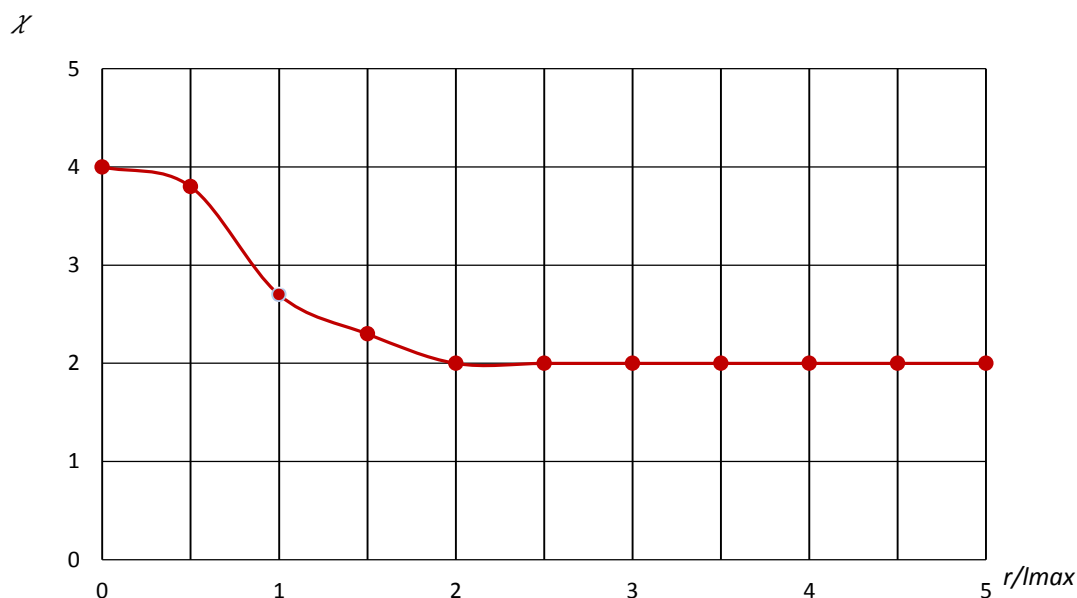


Рис. 1. Зависимость влияния звукового поля (χ) от расстояния

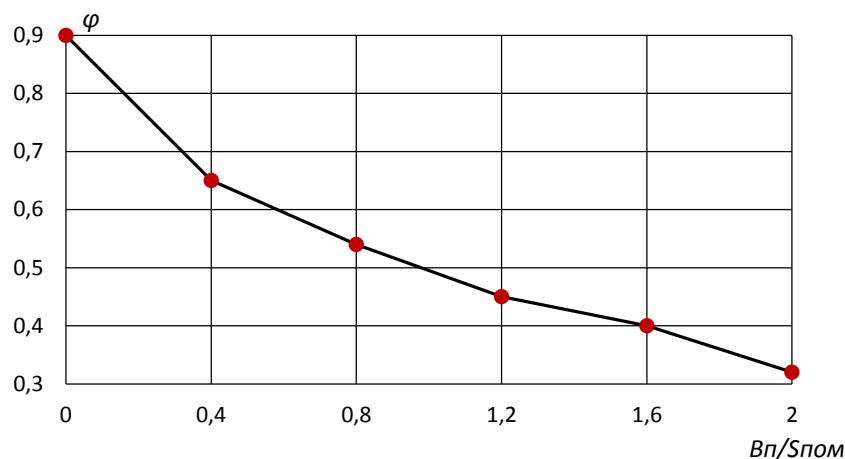


Рис. 2. Зависимость нарушения диффузности звукового поля помещения от отношения постоянной помещения к площади

Для расчетов уровней звукового давления (L) наиболее удобным является уравнение, где L_w – уровень звуковой мощности источника шума, дБ; K – коэффициент затухания ($K=20$).

$$L = L_w - K \lg r + 10 \lg \varphi - 8 \quad (4)$$

В качестве отправной точки для расчетов применяются уровни звукового давления ($L_{\text{ист}}$), создаваемого источником шума и определяемые согласно уравнению:

$$L = L_{\text{ист}} - 20 \lg r + 10 \lg \varphi - 8 \quad (5)$$

При оценке интенсивности отраженного звука ($I_{\text{отп}}$) необходимо учитывать характеристики помещения:

$$I_{\text{отп}} = \frac{4 \psi W}{B_{\Pi}} \quad (6)$$

$$B_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i}{1 - \alpha}; \quad \bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i}{S_{\text{пом}}} \quad (7)$$

где ψ – коэффициент, отражающий нарушение диффузности звукового поля;

B_{Π} – постоянная характеристика помещения, м^2 [4, 5];

α_i – коэффициент поглощения звука;

S_i и $S_{\text{пом}}$ – площадь i -й поверхности и общая площадь помещения, м^2 .

Общее воздействие прямого и отраженного звука, создаваемых оборудованием в контрольных точках производственного помещения на рабочем месте без шумозащитной системы оценивается по формуле:

$$L = L_w + 10 \lg \left(\frac{\chi \varphi}{2\pi r^2} + \frac{4\psi}{B_{\Pi}} \right) + 10 \lg K_T - 8 \quad (8)$$

В большинстве случаев обеспечить требуемый уровень шумоподавления непосредственно в самом источнике шума оказывается невозможным. Этот факт приводит к

необходимости установки звукоизолирующего ограждения, соответствующего требованиям по звукоизоляции и звукопоглощению. В случае размещении источника шума внутри ограждающей конструкции наблюдается неравномерность излучения от элементов конструкции, ориентированных под разными углами по отношению к точке измерения. Энергия, излучаемая стенами под углом 90° к контрольной точке измерения, составляет $j = 1/\pi$, а под углом $180^\circ - j = 1/2\pi$ [86].

Уровни шума (L) в производственном помещении, генерируемые работающим оборудованием и с учетом использования звукоизолирующих ограждений, рассчитываются по формуле:

$$L = L_w + 10 \lg \left(\frac{\chi_{огр}}{2\pi^2} + \frac{4\psi_{огр}}{A_{огр}} \right) + 10 \lg S_{огр} + 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0.1(3II_i - 10 \lg j_i)} - 8 + 10 \lg \left(\frac{\chi}{2\pi^2} + \frac{4\psi}{B} \right) + 10 \lg K_Y \quad (9)$$

где L_w – уровень звуковой мощности источника, дБ;

$A_{огр} = \alpha_{огр} \cdot S_{огр}$ – постоянная ограждения;

$\alpha_{огр}$ – коэффициент звукопоглощения;

$S_{огр}$ – площадь ограждающей конструкции, m^2 ;

r и r_i – расстояние от расчетной точки до источника и внутренней поверхности ограждения, м;

$3II_i$ – звукоизоляция ограждающей конструкции, дБ;

B – характеристика помещения, m^2 ;

K_Y – количество источников звука.

Общая звукоизоляция ($3II$) ограждающих конструкций определяется уравнением [8]:

$$3II = 3II_{\Pi} - 10 \lg \left[S_{\Pi} + \sum_{i=1}^n S_i 10^{0.1(3II_{\Pi} - 3II_i)} \right] - 10 \lg S_{\Pi} \quad (10)$$

где $3II_{\Pi}$ и S_{Π} – звукоизоляция (дБ) и площадь (m^2) ограждающего экрана;

$3II_i$ и S_i – звукоизоляция и площадь участков, отличающихся от экрана;

n – количество участков, имеющих отличия от экрана.

Таким образом, для прогнозирования уровней шума в контрольной точке производственного помещения, если известны уровни звукового давления оборудования (L_w), расчет осуществляется по формуле (1.9). К параметрам помещения относятся: расстояние от источника до рабочего места (r) и постоянная помещения (B_{Π}). К параметрам ограждения относятся: размеры, постоянная ограждения и звукоизоляция его элементов ($3II_i$).

Для корректного прогнозирования также необходимо учитывать прямой и отраженный звук. Прямой звук распространяется непосредственно от источника шума к контрольной точке, в то время как отраженный звук достигает контрольной точки после отражений от стен, пола и потолка помещения. Постоянная помещения (B_{Π}) характеризует акустические свойства помещения и влияет на уровень отраженного звука. Чем больше значение B_{Π} , тем меньше влияние отраженного звука на общий уровень шума в контрольной точке.

Размеры ограждения и его расположение относительно источника шума и контрольной точки также существенно влияют на эффективность снижения уровня шума.

Звукоизоляция элементов ограждения ($3II_i$) определяет способность ограждения снижать уровень шума, чем она больше, тем меньше звуковой энергии проникает через ограждение.

Звуковую мощность и уровни звукового давления рассчитываются по формулам:

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{2 \cdot 10^{-5}} \quad L_w = 10 \lg \frac{W}{10^{-12}} \quad (11)$$

Для эффективного снижения фонового акустического шума на производственных площадках целесообразно применение комплекса мер, включающих в себя как технические, так и организационные решения [9-13]. К первым относятся установка шумозащитных экранов, применение звукопоглощающих облицовок на стенах и потолках, виброизоляция оборудования и использование глушителей для вентиляционных систем. Ко вторым – рациональное размещение оборудования, организация рабочих мест с учетом минимизации шумового воздействия, а также внедрение режимов труда и отдыха, предусматривающих снижение шумовой нагрузки на персонал.

Список литературы

1. Месхи, Б. Ч. Улучшение условий труда операторов металлорежущих и деревообрабатывающих станков за счет снижения шума в рабочей зоне (теория и практика): [моногр.] / Б. Ч. Месхи. – ДГТУ: Ростов н/Д, 2003. – 131 с.
2. Чукарин, А. Н. Теория и методы акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки / А. Н. Чукарин. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2005. – 151 с. – ISBN 5-7890-0326-5. – EDN QNAZWX.
3. Воробинская, Л. И. Шум от металлорежущих станков на предприятиях машиностроения и борьба с ним / Л. И. Воробинская // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 4(57). – С. 15-19. – EDN CATNYG.
4. Иванов, Н. И. Основы виброакустики: учебник для вузов / Н. И. Иванов, А. С. Никифоров. – Санкт-Петербург: Политехника, 2000. – 482 с. – ISBN 5-7325-0599-7.
5. Иванов, Н. И. Акустические экраны: конструкция, материалы, эффективность // Мир дорог. – 2008. – № 35. – С. 64-66.
6. Зверев, А. Я. Экспериментальное определение акустических и виброакустических характеристик многослойных композитных панелей / А. Я. Зверев, В. В. Черных // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64, № 6. – С. 727-736. – DOI 10.1134/S0320791918060151. – EDN VMPBLP.
7. Гогуадзе, М. Г. Анализ акустических характеристик на рабочих местах

References

1. Meskhi, B. Ch. Improving the working conditions of operators of metal-cutting and woodworking machines by reducing noise in the working area (theory and practice): [monograph] / B. Ch. Meskhi. - DSTU: Rostov n / D, 2003. - 131 p.
2. Chukarin, A. N. Theory and methods of acoustic calculations and design of technological machines for mechanical processing / A. N. Chukarin. - Rostov-on-Don: DSTU Publishing Center, 2005. - 151 p. - ISBN 5-7890-0326-5. - EDN QNAZWX.
3. Vorobinskaya, L. I. Noise from metal-cutting machines at mechanical engineering enterprises and its control / L. I. Vorobinskaya // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2021. - No. 4 (57). - P. 15-19. - EDN CATNYG.
4. Ivanov, N. I. Fundamentals of vibroacoustics: a textbook for universities / N. I. Ivanov, A. S. Nikiforov. – Sanki-Petersburg: Polytechnic, 2000. – 482 p. – ISBN 5-7325-0599-7.
5. Ivanov, N. I. Acoustic screens: design, materials, efficiency // World of Roads. – 2008. – No. 35. – P. 64-66.
6. Zverev, A. Ya. Experimental determination of acoustic and vibroacoustic characteristics of multilayer composite panels / A. Ya. Zverev, V. V. Chernykh // Acoustic journal. - 2018. - Vol. 64, No. 6. - P. 727-736. - DOI 10.1134/S0320791918060151. - EDN VMPBLP.
7. Goguadze, M. G. Analysis of acoustic characteristics at the workplaces of special

специальных расточных и осетокарных станков // Станки Инструмент «СТИН», 2020. – С. 9-11.

8. **Финоченко, Т. А.** Экспериментальные исследования спектров шума в рабочей зоне прутковых токарных станков // Безопасность и охрана труда. 2015. – №2. – С. 57-59.

9. **Яицков, И. А.** Проблемы негативного воздействия производственного шума на работников железнодорожного транспорта / И. А. Яицков, И. Г. Переверзев, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4. – С. 112-114. – EDN YURPTF.

10. Характеристики шумового дискомфорта в рабочей зоне прутковых токарных станков / С. А. Раздорский, Т. А. Финоченко, А. Н. Чукарин, И. А. Яицков // Мониторинг. Наука и технологии. – 2018. – № 3(36). – С. 81-84. – EDN YCMIFF.

11. **Yaitskov, I.** Experimental studies of vibroacoustic characteristics of the basic structure parts of the traction rolling stock and transportation technological vehicles / I. Yaitskov, A. Nazaretov, A. Kochetkov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2131, No. 2. – P. 022045. – DOI 10.1088/1742-6596/2131/2/022045. – EDN CGKLFG.

12. Актуальные проблемы обеспечения охраны труда на производстве / М. Э. Цаболова, А. А. Тациян, Т. А. Финоченко, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1(66). – С. 100-104. – EDN BSRDEM.

13. **Nazaretov, A. A.** Rationale for choosing the sound-absorbing materials for the operator's cabins of the rail-grinding machine / A. A. Nazaretov, I. A. Yaitskov, N. M. Yaitskova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1111, No. 1. – P. 012042. – DOI 10.1088/1757-899x/1111/1/012042. – EDN EAXXZJ.

14. **Фролов, В. Э.** Экспериментальные исследования шума и вибрации на участках обкатки двигателей внутреннего сгорания и тяговых электродвигателей машиностроительных предприятий / В. Э.

boring and turning machines // Machine Tools "STIN", 2020. – P. 9-11.

8. **Finochenko, T. A.** Experimental studies of noise spectra in the working area of bar turning machines // Occupational Safety and Health. 2015. – No. 2. – P. 57-59.

9. **Yaitskov, I. A.** Problems of the negative impact of industrial noise on railway workers / I. A. Yaitskov, I. G. Pereverzev, T. A. Finochenko // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2018. - No. 4. - P. 112-114. - EDN YURPTF.

10. Characteristics of noise discomfort in the working area of bar turning machines / S. A. Razdorsky, T. A. Finochenko, A. N. Chukarin, I. A. Yaitskov // Monitoring. Science and Technology. - 2018. - No. 3 (36). - P. 81-84. - EDN YCMIFF.

11. Yaitskov, I. Experimental studies of vibroacoustic characteristics of the basic structure parts of the traction rolling stock and transportation technological vehicles / I. Yaitskov, A. Nazaretov, A. Kochetkov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2131, No. 2. – P. 022045. – DOI 10.1088/1742-6596/2131/2/022045. – EDN CGKLFG.

12. Current Issues of Occupational Safety and Health in Production / M. E. Tsabolova, A. A. Tashchiyan, T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2024. - No. 1 (66). - P. 100-104. - EDN BSRDEM.

13. **Nazaretov, A. A.** Rationale for choosing the sound-absorbing materials for the operator's cabins of the rail-grinding machine / A. A. Nazaretov, I. A. Yaitskov, N. M. Yaitskova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1111, No. 1. – P. 012042. – DOI 10.1088/1757-899x/1111/1/012042. – EDN EAXXZJ.

14. **Frolov, V. E.** Experimental studies of noise and vibration in the running-in areas of internal combustion engines and traction electric motors of machine-building enterprises / V. E. Frolov, I. A. Yaitskov //

Фролов, И. А. Яицков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 271-278. – EDN KSVILS.

Bulletin of Tula State University. Technical sciences. - 2020. - No. 3. - P. 271-278. - EDN KSVILS.

A. E. Nabokov, S. M. Korobov, T. A. Finochenko

BACKGROUND ACOUSTIC NOISE IN AN INDUSTRIAL ROOM WHILE OPERATING METALWORKING MACHINES

Abstract. Considering the acoustic characteristics of industrial premises is an important aspect when developing noise reduction measures. This article examines the problem of background acoustic noise in industrial premises – its sources, characteristics, impact on personnel health and performance, as well as methods for monitoring and reducing noise levels.

Keywords: background acoustic noise, industrial premises, sound pressure level, occupational safety, noise protection.

For citation: Nabokov, A. E. Background Acoustic Noise in an Industrial Room while Operating Metalworking Machines / A. E. Nabokov, S. M. Korobov, T. A. Finochenko // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 60–66. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_60.

Сведения об авторах

Набоков Александр Евгеньевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Строительная механика»,
старший преподаватель,
e-mail: mr.nae@yandex.ru

Коробов Сергей Михайлович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»
аспирант,
e-mail: ksm7705@mail.ru

Финоченко Татьяна Анатольевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»,
заведующий кафедрой,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: fta09@bk.ru

Information about the authors

Nabokov Alexander Evgenievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Structural Mechaniscs»,
Senior Lecturer,
e-mail: mr.nae@yandex.ru

Korobov Sergey Mikhailovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life Safety»,
Postgraduate Student,
e-mail: ksm7705@mail.ru

Finochenko Tatiana Anatolievna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life Safety»,
Head of the Chair,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor
e-mail: fta09@bk.ru

В. Н. Нестерук, Д. А. Рудиков

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА НА БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования условий труда и оценки рисков для здоровья работников локомотивных бригад магистрального движения (РЛБМД). Установлены количественные зависимости между воздействием вредных факторов производственной среды (виброакустических, химических, микроклиматических и биологических) и показателями профессионально-обусловленной и профессиональной патологии. Разработаны и научно обоснованы организационные, технические и санитарно-гигиенические мероприятия, направленные на снижение профессиональных рисков и сохранение здоровья РЛБМД. Показана социально-экономическая эффективность предлагаемых решений.

Ключевые слова: работники локомотивных бригад, условия труда, профессиональный риск, виброакустические факторы, химическое загрязнение, биологический фактор, мероприятия по охране труда, ультрафиолетовое обеззараживание.

Для цитирования: Нестерук, В. Н. Методы снижения влияния человеческого фактора на безопасность труда на железнодорожном транспорте / В. Н. Нестерук, Д. А. Рудиков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 67–71. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_67.

Введение. Железнодорожный транспорт является основой транспортной системы Российской Федерации. Эксплуатационная протяженность сети железных дорог общего пользования составляет 85,5 тыс. км, а парк магистральных локомотивов превышает 11 тыс. единиц [1, 8–12]. Работники локомотивных бригад (РЛБ) обеспечивают безопасность движения и бесперебойность перевозочного процесса. Их численность достигает 115 тыс. человек, что делает данную профессиональную группу одной из наиболее массовых в отрасли.

Трудовая деятельность РЛБ характеризуется воздействием комплекса неблагоприятных факторов рабочей среды и высокой напряженностью трудового процесса. По данным ВОЗ/МОТ, ежедневно в мире в результате заболеваний и травм, связанных с трудом, погибает около 5 тыс. человек [2]. В Российской Федерации ежегодно регистрируется до 7 тыс. профессиональных заболеваний, при этом на железнодорожном транспорте работники локомотивных бригад занимают лидирующее место по уровню профессиональной заболеваемости [3].

Несмотря на тенденцию снижения уровня профессиональной патологии, наблюдается рост производственно-обусловленных заболеваний, в частности сердечно-сосудистой, опорно-двигательной и дыхательной систем. Это вызывает значительные социально-экономические потери, включая медицинские расходы, выплаты пособий и потери ВВП вследствие преждевременной смертности и инвалидности [4].

Пандемия COVID-19 актуализировала проблему биологических рисков, ранее недооценённых в оценке условий труда локомотивных бригад. В связи с этим разработка научно обоснованного комплекса мер по сохранению здоровья и профессиональной работоспособности РЛБ является приоритетной задачей в системе управления профессиональными рисками на железнодорожном транспорте.

Цель исследования. Разработка элементов информационно-коммуникационной технологии для объективизации данных о состоянии условий труда РЛБ и обоснование комплекса организационных, технических и санитарно-гигиенических мероприятий, направленных на сохранение их здоровья и профессиональной трудоспособности.

Материалы и методы исследования. Исследование проводилось на локомотивах грузового и пассажирского движения, разделённых на четыре группы: электровозы и тепловозы, прошедшие капитальный ремонт (ЭПКР, ТПКР), и новые локомотивы (ЭН, ТН). Для каждой группы было отобрано по 10 локомотивов различных серий и годов выпуска.

Оценка факторов рабочей среды осуществлялась в соответствии с требованиями [5–7]:

- Приказа Минтруда России от 24.01.2014 № 33н «Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда»;

- СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности факторов среды обитания»;

- СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда».

Применялись методы расчета неканцерогенного и канцерогенного риска (Р 2.1.10.1920-04), статистический анализ заболеваемости, регрессионный и факторный анализ, а также компьютерное моделирование воздушных потоков с использованием SolidWorks Flow Simulation.

Для автоматизации оценки разработана зарегистрированная в Роспатенте программа для ЭВМ «Риск развития профессионально-обусловленной и профессиональной патологии у работников локомотивных бригад» (№ 2021618616).

Результаты исследования и обсуждение. Гигиеническая оценка условий труда

Установлено, что на работников локомотивных бригад воздействует совокупность вредных и опасных факторов:

- уровни шума в кабинах локомотивов достигают 108 дБА при ПДУ 80 дБА;

- общая вибрация превышает нормативы по вертикальным составляющим до 14 раз;

- в тепловозах зафиксировано превышение концентрации диоксида азота в 10–11 раз;

- перепады температур по вертикали в кабинах составляют 10–18 °С;

- в условиях эпидемической напряжённости возрастает роль биологического фактора.

Тяжесть и напряжённость труда оценены как вредные условия 1–2 ст. (классы 3.1–3.2).

Оценка профессиональных рисков [8–14]. Суммарный индекс неканцерогенного риска (Н_и) для локомотивных бригад, работающих на тепловозах после капитального ремонта, составил 13,5, что соответствует чрезвычайно высокому уровню риска. Основными мишенями воздействия являются органы дыхания, сердечно-сосудистая и иммунная системы. Канцерогенный риск при эксплуатации тепловозов ТПКР достигает $5,2 \times 10^{-3}$, что эквивалентно 52 дополнительным случаям онкологических заболеваний на 10 тыс. работников в год.

Биологический фактор и профилактические меры. Моделирование распространения аэрозолей в кабине локомотива показало, что использование ультрафиолетовых рециркуляторов с длиной волны 254–265 нм снижает концентрацию микроорганизмов на 95% за 5 минут и обеспечивает безопасную микробиологическую среду при 8-часовом пребывании.

Социально-экономическая эффективность. Расчёты показали, что общие ежегодные потери от профессиональной патологии РЛБМД достигают 2,27 млрд руб. Внедрение комплекса профилактических мер позволяет сократить затраты на 257 млн руб. ежегодно.

Заключение. Проведенное комплексное исследование позволило разработать научно обоснованный комплекс мероприятий по улучшению условий труда и сохранению здоровья работников локомотивных бригад магистрального движения. Установлены количественные зависимости между воздействием комплекса факторов производственной среды и показателями риска развития производственно-обусловленной и профессиональной патологии у РЛБМД. Определены критические возрастные периоды и стажевые характеристики формирования профессиональной патологии.

Практические рекомендации:

Технические меры: Ускоренное обновление парка локомотивов; совершенствование шумо- и виброзащиты кабин; оснащение систем вентиляции установками ультрафиолетового обеззараживания воздуха.

Организационные меры: Оптимизация режимов труда и отдыха с учетом дозовой нагрузки вредных факторов; использование разработанной программы для ЭВМ для прогнозирования индивидуальных рисков.

Санитарно-гигиенические меры: Регулярный контроль биологического загрязнения воздушной среды и поверхностей; внедрение систем мониторинга условий труда в реальном времени.

Реализация предложенного комплекса мер обеспечит значительное снижение профессиональных рисков, сохранение профессионального долголетия РЛБМД и повышение безопасности железнодорожных перевозок.

Перспективы дальнейших исследований включают изучение сочетанного действия факторов рабочей среды в условиях возрастающей интенсивности перевозок, разработку методов ранней диагностики профессионально-обусловленных заболеваний и совершенствование системы управления профессиональными рисками.

Список литературы

1. Транспорт в России. 2020: статистический сборник / Росстат. – М., 2020. – 108 с.
2. Доклад ВОЗ/МОТ (2021) «Профилактические меры по снижению профессиональных заболеваний и травматизма».
3. Данные НИИ медицины труда им. акад. Н.Ф. Измерова «Анализ профессиональной заболеваемости в Российской Федерации».
4. Леванчук Л. А. Обоснование комплекса мероприятий по обеспечению безопасности производственного процесса работников локомотивных бригад: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2022. – 141 с.
5. Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда: Приказ Минтруда России от 24.01.2014 № 33н (ред. от 09.12.2022) // Российская газета. – 2014. – № 84.
6. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: СанПиН 1.2.3685-21: утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 28.01.2021 // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202103020024>.

References

1. Transport in Russia. 2020: statistical collection / Rosstat. – M., 2020. – 108 p.
2. WHO/ILO Report (2021) "Preventive measures to reduce occupational diseases and injuries".
3. Data from the N.F. Izmerov Research Institute of Occupational Medicine "Analysis of occupational morbidity in the Russian Federation".
4. Levanchuk L. A. Justification of a set of measures to ensure the safety of the production process of locomotive crew workers: diss. ... Cand. of Technical Sciences. - St. Petersburg, 2022. - 141 p.
5. On approval of the Methodology for conducting a special assessment of working conditions: Order of the Ministry of Labor of Russia dated January 24, 2014 No. 33n (as amended on December 9, 2022) // Rossiyskaya Gazeta. - 2014. - No. 84.
6. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans: SanPiN 1.2.3685-21: approved. By the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on January 28, 2021 // Official Internet portal of legal information. - URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202103020024>.

7. Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки: Р 2.1.10.1920-04: утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 05.03.2004. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 25 с.

8. **Finochenko, T. A.** Risk Management in Transportation Safety System / T. A. Finochenko, L. V. Dergacheva, I. A. Yaitskov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2020 International Science and Technology Conference on Earth Science, ISTCEarthScience 2020, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. – IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 022050. – DOI 10.1088/1755-1315/666/2/022050. – EDN JZEOEI.

9. **Финоченко, Т. А.** Достойный труд - безопасный труд / Т. А. Финоченко, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 2. – С. 5-6. – EDN YAKRTF.

10. **Борисова, А. В.** Риск-ориентированный подход к обеспечению безопасности труда / А. В. Борисова // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1(50). – С. 5-7. – EDN UPKIKM.

11. **Воробинская, Л. И.** Специальная оценка условий труда как информационная база для внедрения риск-ориентированного подхода в сфере охраны труда / Л. И. Воробинская, В. А. Финоченко, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2(51). – С. 18-21. – EDN OYYDZB.

12. **Веревкина, О. И.** Влияние человеческого фактора на проблемы повышения безопасности движения / О. И. Веревкина, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4. – С. 16-21. – EDN YMAPKP.

13. Актуальные проблемы обеспечения охраны труда на производстве / М. Э. Цаболова, А. А. Тациян, Т. А.

7. Guidelines for assessing occupational risks to workers' health. Organizational and methodological foundations, principles and criteria for assessment: R 2.1.10.1920-04: approved. by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on 05.03.2004. – M.: Federal Center for State Sanitary and Epidemiological Surveillance of the Ministry of Health of Russia, 2004. – 25 p.

8. **Finochenko, T. A.** Risk Management in Transportation Safety System / T. A. Finochenko, L. V. Dergacheva, I. A. Yaitskov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2020 International Science and Technology Conference on Earth Science, ISTCEarthScience 2020, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. – IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 022050. – DOI 10.1088/1755-1315/666/2/022050. – EDN JZEOEI.

9. **Finochenko, T. A.** Decent work - safe work / T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. – 2018. – No. 2. – P. 5-6. – EDN YAKRTF.

10. **Borisova, A. V.** Risk-oriented approach to ensuring occupational safety / A. V. Borisova // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. – 2020. – No. 1 (50). – P. 5-7. – EDN UPKIKM.

11. **Vorobinskaya, L. I.** Special assessment of working conditions as an information base for the implementation of a risk-based approach in occupational safety / L. I. Vorobinskaya, V. A. Finochenko, T. A. Finochenko // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. – 2020. – No. 2 (51). – P. 18-21. – EDN OYYDZB.

12. **Verevkina, O. I.** Influence of the human factor on the problems of improving traffic safety / O. I. Verevkina, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. – 2017. – No. 4. – P. 16-21. – EDN YMAPKP.

13. Current Issues of Occupational Safety and Health in Production /

Финоченко, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1(66). – С. 100-104.

14. **Баланов, И. А.** Безопасный труд при эксплуатации железнодорожного подвижного состава / И. А. Баланов, Ю. А. Антонов, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2(67). – С. 19-24.

M. E. Tsabolova, A. A. Tashchian, T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2024. - No. 1 (66). - P. 100-104.

14. **Balanov, I. A.** Safe work during operation of railway rolling stock / I. A. Balanov, Yu. A. Antonov, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2024. - No. 2 (67). - P. 19-24.

V. N. Nesteruk, D. A. Rudikov

METHODS OF REDUCING THE INFLUENCE OF THE HUMAN FACTOR ON OCCUPATIONAL SAFETY IN RAILWAY TRANSPORT

Abstract. The article presents the results of a comprehensive study of working conditions and health risk assessment for locomotive crews engaged in mainline operations. Quantitative relationships between harmful occupational factors (vibration, acoustic, chemical, microclimatic, and biological) and the indicators of occupationally conditioned and occupational diseases were established. Organizational, technical, and sanitary-hygienic measures aimed at reducing occupational risks and preserving the health of locomotive crew members were developed and scientifically substantiated. The socio-economic efficiency of the proposed measures is demonstrated.

Keywords: locomotive crews, working conditions, occupational risk, vibration and acoustic factors, chemical pollution, biological factor, occupational health measures, ultraviolet disinfection.

For citation: Nesteruk, V. N. Methods of Reducing the Influence of the Human Factor on Occupational Safety in Railway Transport / V. N. Nesteruk, D. A. Rudikov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 67–71. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_67.

Сведения об авторах

Нестерук Вероника Николаевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедры «Безопасность жизнедеятельности»,
студент,
e-mail: nesteruknika@gmail.com

Рудиков Дмитрий Алексеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедры «Безопасность жизнедеятельности»,
кандидат технических наук, доцент
e-mail: d-studio@mail.ru

Information about the authors

Nesteruk Veronika Nikolaevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life Safety»,
Student,
e-mail: nesteruknika@gmail.com

Rudikov Dmitry Alekseevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life Safety»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: d-studio@mail.ru

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЛУЧШЕНИЮ УСЛОВИЙ ТРУДА НА ПРЕДПРИЯТИИ «РОСТСЕЛЬМАШ»

Аннотация. В статье проведён анализ текущих условий труда на крупном российском производственном предприятии – АО «Ростсельмаш», выявлены ключевые риски для здоровья и безопасности работников и предложен практический комплекс мероприятий, направленный на снижение производственного травматизма, профзаболеваемости и повышение производительности труда. Рекомендации основаны на анализе открытых данных о деятельности предприятия, современных нормативных требованиях в области охраны труда и международных практиках управления безопасностью. Представлен план внедрения мероприятий и оценка ожидаемых эффектов.

Ключевые слова: травматизм, «Ростсельмаш», условия труда, охрана труда, профессиональные риски, производственная безопасность.

Для цитирования: Омельченко, Д. А. Рекомендации по улучшению условий труда на предприятии «РОСТСЕЛЬМАШ» / Д. А. Омельченко, В. А. Фирсов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 72–76. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_72.

Введение. В условиях современного производства, где требования к охране труда и соблюдению законодательных норм становятся все более строгими, оценка текущих условий труда на предприятии позволяет выявить существующие проблемы и риски. Исследование включает в себя не только обзор действующих норм и стандартов, но и разработку практических рекомендаций, направленных на улучшение безопасности и здоровья работников. Внедрение предложенных технических и организационных мер может существенно снизить количество профессиональных заболеваний и создать более эффективную рабочую атмосферу, что, в свою очередь, позитивно скажется на общей производительности и репутации предприятия.

Цель исследования. Провести анализ существующих условий труда на предприятии и разработать практические рекомендации для их улучшения с учетом современных законодательных норм и стандартов.

АО «Ростсельмаш» – одно из ведущих российских предприятий по разработке и производству сельскохозяйственной техники с долгой историей и широким ассортиментом продукции [1-3]. В последние годы предприятие сталкивается с экономическими трудностями: изменение рынков сбыта, необходимость оптимизации производства и корректировки инвестиционных планов. Эти факторы влияют и на состояние условий труда – через реструктуризацию, изменение кадровой политики и инвестиционных приоритетов. Для разработки адекватных рекомендаций важно учитывать, как отраслевые особенности производства сельхозмашин, так и текущую стратегию компании [4-9].

Характеристика производства и выявленные проблемы

1. Производственная специфика. Предприятие производит тяжёлую сельскохозяйственную технику (зерноуборочные комбайны, трансмиссии, тяговую технику и т. п.), что предполагает сочетание тяжёлых механических работ, операций с металлообработкой, сварочных и окрасочных процессов, сборки узлов и регулировки электроники. Соответственно, основными профессиональными факторами являются: физическая нагрузка, вибрация, шум, локальные выбросы сварочных и лакокрасочных

веществ, повышенная температура в отдельных цехах, риск травм при механической обработке и подъёме грузов.

2. Экономический контекст. В 2024 – 2025 гг. предприятие корректировало инвестиционные планы и сообщало о сокращении долгосрочных инвестиций и пересмотре проектов модернизации, что может ограничивать капитальные вложения в обновление инженерных систем охраны труда. Одновременно в ряде публикаций отмечается снижение производства и реструктуризация рынков сбыта, что отражается на кадровой политике. Эти факторы влияют на приоритеты в расходах на охрану труда.

3. Кадровые изменения. Публичная статистика и аналитические материалы указывают на сокращение части штата и изменения в структуре персонала, что повышает нагрузку на оставшихся работников (смены, переработки) и может приводить к нарушению регламентов по охране труда при недостатке кадров и компетенций.

4. Система управления охраной труда. Как и на многих крупных производственных площадках, вероятно присутствуют отдельные сильные практики (медпункты, инструктажи), однако встречаются типичные недостатки: неполное внедрение современных эргономических решений, фрагментарность мониторинга микроклимата и вредных веществ в рабочих зонах, недостаточная цифровизация учёта инцидентов и обучения персонала.

Рекомендации по улучшению условий труда

Предлагаемый комплекс мероприятий разбит по уровням: организационные, технические (инженерные), медицинские/санитарные и обучающие/социальные меры. Для каждой группы приведены краткие обоснования и ожидаемые эффекты.

1. Организационные меры

1.1. Ревизия и риск-ориентированное распределение бюджета охраны труда. В условиях ограниченных инвестиций рекомендовано приоритизировать меры, дающие наибольший позитивный эффект на снижение травматизма и профзаболеваемости (например, локальные вытяжки в сварочном/окрасочном цехе, антивибрационные опоры для станков, системы локального освещения на участках точной сборки). Это позволит максимизировать «эффект на единицу вложений». (Ожидаемый эффект: снижение профессиональных рисков при минимальных капитальных затратах.)

1.2. Оптимизация графиков и сменности. Пересмотр сменных графиков с учётом данных по утомляемости и происшествиям: введение ограничений на продолжительность смены при тяжёлой ручной работе, увеличение числа коротких перерывов, ротация работников между монотонными и более активными операциями. (Ожидаемый эффект: снижение ошибок, аварий и утомляемости.)

1.3. Система учёта инцидентов и near miss с цифровизацией. Внедрить простое цифровое решение (мобильное приложение или внутренняя web-форма) для фиксации инцидентов и потенциально опасных ситуаций: это даёт оперативный аналитический материал для адресного улучшения условий труда. (Ожидаемый эффект: уменьшение числа повторяющихся происшествий.)

2. Технические и инженерные меры

2.1. Локальная вентиляция и очистка воздуха. Приоритет – установка или модернизация локальных вытяжных устройств в зонах сварки, шлифовки и окраски; фильтрация воздушных потоков и регулярный мониторинг концентраций вредных веществ. (Эффект: снижение профзаболеваемости дыхательных путей и уменьшение общей токсической нагрузки.)

2.2. Шумопоглощение и антивибрационные мероприятия. Применение звукопоглощающих панелей, изоляция шумных агрегатов и использование антивибрационных опор для станков; обязательный аудит уровня шума и выдача средств индивидуальной защиты (СИЗ) в соответствии с результатами измерений. (Эффект: снижение риска потерянных рабочих смен и профессиональной тугоухости.)

2.3. Эргономика рабочих мест. Модернизация рабочей мебели, подъёмно-транспортного оборудования (пневмоподъёмники, подъёмники для узлов), применение приспособлений для снижения ручного подъёма тяжестей. Разработка типовых эргономических схем для основных операций сборки. (Эффект: снижение мышечно-скелетных расстройств и травм.)

2.4. Освещение и визуальная безопасность. Повышение уровня локального освещения на рабочих местах, внедрение визуальных индикаторов состояния станков и зон повышенного риска. (Эффект: снижение ошибок при сборке и аварий.)

2.5. Модернизация средств коллективной защиты. Инвестиции в ограждения движущихся частей, системы аварийной остановки и защитные барьеры в местах механического травмирования; применение стандартов по защите движущихся частей машин (ГОСТ/ISO). (Эффект: снижение механических травм.)

3. Медицинские и санитарно-гигиенические меры

3.1. Расширение программы периодических медицинских осмотров. Увеличить частоту и глубину обследований для групп риска (работы с вредными веществами, высокая вибрация, шум), подключить специалистов профпатологии для оценки показателей. (Эффект: ранняя диагностика и снижение хронизации заболеваний.)

3.2. Привлечение телемедицины и цифрового мониторинга здоровья. Внедрить мобильные скрининги (анкетирование, краткие тесты на утомляемость, мониторинг сна для сменных работников) и обеспечить доступ к психологической помощи. (Эффект: уменьшение риска аварий, связанных с переутомлением и стрессом.)

4. Обучение и мотивация персонала

4.1. Модульное обучение по безопасности с элементами VR/AR (по возможности). Для ключевых операций разработать интерактивные тренинги по безопасной работе, включающие отработку действий при аварийных ситуациях. (Эффект: повышение навыков и снижение ошибок.)

4.2. Стимулирующие программы для инициатив по безопасности. Внедрить поощрения (нематериальные и материальные) за предложения по улучшению условий труда и за «чистые» периоды без травм. (Эффект: вовлечённость персонала в систему безопасности.)

План поэтапной реализации и оценка эффективности

Этап 1 (0–6 месяцев)

Аудит условий труда (визуальный и инструментальный) по приоритетным зонам; расчёт экономической эффективности предложенных мер; запуск цифровой системы учёта инцидентов. *Ключевые индикаторы:* завершённый аудит; внедрённая форма учёта; план инвестиций.

Этап 2 (6–18 месяцев)

Реализация технических мер (локальные вытяжки, освещение, антивибрация), закупка СИЗ, запуск обучающих программ. *Ключевые индикаторы:* уменьшение концентраций вредных веществ; снижение уровня шума; количество работников, прошедших обучение.

Этап 3 (18–36 месяцев)

Мониторинг результатов, корректировка мер, институализация лучших практик, масштабирование успешных пилотов на другие площадки компании. *Ключевые индикаторы:* снижение числа травм на 20–40% (целевая ориентировочная), уменьшение профзаболеваемости, повышение удовлетворённости персонала (опрос).

Экономическое обоснование

Многие предложенные меры дают быстрый положительный эффект при относительно небольших капитальных вложениях (локальные вытяжки, эргономические приспособления, цифровизация учёта инцидентов). Ожидаемая отдача проявится в снижении затрат на временную нетрудоспособность, уменьшении штрафных санкций и повышении производительности за счёт снижения простоев и брака. В условиях пересмотра крупных

инвестиционных проектов (отсрочка крупных капитальных вложений) рекомендовано направлять доступные ресурсы именно в меры с наибольшей краткосрочной окупаемостью.

Заключение. Улучшение условий труда на предприятии АО «Ростсельмаш» требует сочетания организационных решений, инженерных улучшений и усиления медицинско-профилактической работы. При ограниченных инвестициях целесообразно ранжировать меры по отношению «эффект/затраты» и начинать с тех, которые дают максимальную отдачу: локальная вентиляция, антивибрационные и шумоподавляющие решения, эргономические приспособления и цифровизация учёта инцидентов. Последовательное внедрение комплекса мер позволит снизить травматизм и профзаболеваемость, повысить лояльность персонала и сохранить производственные показатели в условиях внешних экономических вызовов.

Список литературы

1. Группа компаний «Ростсельмаш». Официальный сайт. Информация о компании, продукции и социальной политике. [<https://rostselmash.com/>]. — Режим доступа: официальный сайт компании
2. **Быков В. Н.** Рекомендации по улучшению условий труда персонала современных организаций // Интеграция науки и практики: взгляд молодых ученых. — 2016.
3. ГОСТ ISO 4254-1—2013 «Машины сельскохозяйственные. Общие требования безопасности» (и сопутствующие стандарты по защите движущихся частей).
4. **Калинина А. Р.** Разработка стратегии развития ОАО «Ростсельмаш» на основе качественного анализа // Новые направления научной мысли. — 2017. — С. 201-204. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44274749>.
5. Безопасность жизнедеятельности / Т. А. Финоченко, И. Г. Переверзев, И. А. Яицков [и др.]; Ростовский государственный университет путей сообщения. — 2-е издание, переработанное и дополненное. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. — 308 с. — ISBN 978-5-88814-843-3. — EDN JPKTRR.
6. **Новиков, Н. Н.** Несчастные случаи обусловленных человеческим фактором / Н. Н. Новиков, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 2(67). — С. 87-98. — EDN VRESFY.
7. **Финоченко, Т. А.** Влияние количественной оценки условий труда на величину производственного риска / Т. А.

References

1. Rostselmash Group of Companies. Official website. Information about the company, products, and social policy. [<https://rostselmash.com/>]. — Access mode: official company website
2. **Bykov V. N.** Recommendations for improving working conditions of personnel of modern organizations // Integration of science and practice: the view of young scientists. - 2016.
3. GOST ISO 4254-1—2013 “Agricultural machinery. General safety requirements” (and related standards for the protection of moving parts).
4. **Kalinina A. R.** Development of a development strategy for OJSC Rostselmash based on qualitative analysis // New directions of scientific thought. - 2017. - P. 201-204. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44274749>.
5. Life Safety / T. A. Finochenko, I. G. Pereverzev, I. A. Yaitskov [et al.]; Rostov State Transport University. — 2nd edition, revised and supplemented. — Rostov-on-Don: Rostov State Transport University, 2019. — 308 p. — ISBN 978-5-88814-843-3. — EDN JPKTRR.
6. **Novikov, N. N.** Accidents caused by human factors / N. N. Novikov, T. A. Finochenko // Proceedings of the Rostov State Transport University. - 2024. - No. 2 (67). - P. 87-98. - EDN VRESFY.
7. **Finochenko, T. A.** The influence of quantitative assessment of working conditions on the magnitude of industrial risk / T. A.

Финоченко, И. Г. Переверзев, В. А. Финоченко // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4(47). – С. 139. – EDN YUQKXO.

8. Актуальные проблемы обеспечения охраны труда на производстве / М. Э. Цаболова, А. А. Ташчян, Т. А. Финоченко, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1(66). – С. 100-104. – EDN BSRDEM.

9. Костюков, А. В. Вопросы электробезопасности на предприятиях машиностроения / А. В. Костюков, А. Н. Чукарин, И. А. Яицков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 581-588. – EDN PCGTMD.

Finochenko, I. G. Pereverzev, V. A. Finochenko // Engineering Bulletin of the Don. - 2017. - No. 4 (47). - P. 139. - EDN YUQKXO.

8. Actual problems of ensuring labor protection in production / M. E. Tsabolova, A. A. Tashchiyan, T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2024. - No. 1 (66). - P. 100-104. - EDN BSRDEM.

9. Kostyukov, A. V. Electrical safety issues at mechanical engineering enterprises / A. V. Kostyukov, A. N. Chukarin, I. A. Yaitskov // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. - 2021. - No. 2. - P. 581-588. - EDN PCGTMD.

D. A. Omelchenko, V. A. Firsov

RECOMMENDATIONS FOR IMPROVING WORKING CONDITIONS AT ROSTSELMASH

Abstract. This article analyzes current working conditions at a large Russian manufacturing enterprise, Rostselmash JSC, identifying key risks to worker health and safety and proposing a practical set of measures aimed at reducing occupational injuries and diseases and increasing productivity. The recommendations are based on an analysis of open data on the enterprise's operations, current occupational safety regulations, and international safety management practices. An implementation plan and an assessment of the expected effects are presented.

Keywords: injuries, Rostselmash, working conditions, occupational safety, professional risks, industrial safety.

For citation: Omelchenko, D. A. Recommendations for Improving Working Conditions at ROSTSELMASH / D. A. Omelchenko, V. A. Firsov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobsheniya. – 2025. – № 4. – P. 72–76. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_72.

Сведения об авторах

Омельченко Дарья Алексеевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»
студент
e-mail: vipkarpov76@gmail.com

Фирсов Виктор Анатольевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»,
кандидат технических наук, доцент
e-mail: vifir1959@rambler.ru

Information about the authors

Omelchenko Daria Alekseevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life Safety»,
Student,
e-mail: vipkarpov76@gmail.com

Firsov Viktor Anatolyevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life Safety»,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor
e-mail: vifir1959@rambler.ru

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ, ТЯГА ПОЕЗДОВ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ

УДК 629.42.004.69 + 06

DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_77

Е. В. Валенцева, С. А. Шапшал, А. С. Шапшал

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА СТОИМОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕГО В ЦЕЛЯХ ОПТИМИЗАЦИИ РАСХОДОВ

Аннотация. На примере предложенной модели движения грузового поезда с заданным профилем пути, и разными сериями тягового подвижного состава с заданными техническими характеристиками, была реализована практика определения стоимости жизненного цикла тягового подвижного состава по вариантам. Также приведены примеры использования полученных результатов с целью оптимизации расходов за жизненный цикл тягового подвижного состава.

Ключевые слова: жизненный цикл, тяговый подвижной состав, стоимость жизненного цикла, эффект, оптимизация расходов.

Для цитирования: Валенцева, Е. В. Практическая реализация расчета стоимости жизненного цикла тягового подвижного состава и использование его в целях оптимизации расходов / Е. В. Валенцева, С. А. Шапшал, А. С. Шапшал // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 77–83. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_77.

Современная практика оценки эффективности инновационных проектов в области проектирования, модернизации тягового подвижного состава (ТПС) связана с его жизненным циклом (рис. 1).



Рис. 1. Этапы жизненного цикла тягового подвижного состава

На первом этапе, в зависимости от прогноза объема перевозок на перспективу, программы поставки парка ТПС, разрабатываются технические требования и проводится расчет стоимости жизненного цикла (Product Life Cycle Cost – LCC) ТПС, способа приобретения ТПС и условий оплаты.

На втором этапе, планируются прямые эксплуатационные расходы – расходы на топливо, электроэнергию на тягу, смазку, обтирку локомотива, экипировочные расходы, расходы на заработную плату локомотивных бригад с учетом страховых взносов.

На третьем этапе, планируются расходы на плановые и неплановые ТОиР, а также капитальный ремонт (КР) за весь жизненный цикл ТПС.

В случае продолжения целесообразности эксплуатации морально устаревшего ТПС необходима оценка модернизации ТПС, что потребует разработки технических требований, планирования расходов как на модернизацию и эксплуатацию, ТО, ТР и КР. Таким образом, производится оценка целесообразности модернизации ТПС или приобретение нового ТПС.

На четвертом этапе планируются процедуры и расходы на утилизацию вследствие полного морального и физического износа ТПС.

В основе концепции жизненного цикла тягового подвижного состава на железнодорожном транспорте лежат следующие нормативно-правовые документы:

- Межгосударственный стандарт ГОСТ 31539-2012. «Цикл жизненный железнодорожного подвижного состава» (введен в действие Приказом Госстандарта № 1171-ст от 26.11.2012) [1];

- Национальный стандарт РФ ГОСТР 27.202-2012. «Надежность в технике. Управление надежностью. Стоимость жизненного цикла» (введен в действие Приказом Росстандарта № 439-ст от 27.09.2012 г.) [2];

- Распоряжение ОАО «РЖД» от 17 марта 2008 г. № 509р «О регламенте определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта» (с изменениями от 02 сентября 2008 г.) [3].

Согласно [3], стоимость жизненного цикла (СЖЦ) ТПС, представляет собой сумму затрат на капитальные вложения и операционную деятельность – на этапах жизненного цикла ТПС:

$$\text{СЖЦ(LCC)} = \sum_{t_n}^{T=t_k} K_{\Pi} + \sum_{t_n}^{T=t_k} (\Delta K_{\text{соп}} + I_t - L_t) \cdot \alpha_t, \quad (1)$$

где K_{Π} – цена приобретения (модернизации) локомотива, тыс. руб.;

$\Delta K_{\text{соп}}$ – сопутствующие единовременные затраты, связанные с внедрением локомотива в эксплуатацию, тыс. руб.;

I_t – годовые операционные расходы (эксплуатация, текущий ремонт и техническое обслуживание локомотива), тыс. руб.;

L_t – расходы на ликвидацию (утилизацию) локомотива, тыс. руб.;

α_t – коэффициент дисконтирования;

t_n – год начала приобретения нового локомотива;

T – год начала ликвидации (утилизации) ТПС, который устанавливается в соответствии с техническими требованиями.

В соответствии с требованиями к анализу для конкретного применения критерия стоимости жизненного цикла отбираются необходимые этапы жизненного цикла или их комбинации [2]. Чаще всего это касается эксплуатации ТПС (прямые эксплуатационные расходы: расходы на тягу, расходы на содержание локомотивных бригад, расходы на экипировку), а также технического обслуживания и ремонта ТПС (расходы на ТО, ТР, КР, содержание ремонтной базы, расходы на устранение отказов ТПС).

Оценке практической реализации формулы (1) уже уделялось внимание авторами в [4,5,6]. При внешней простоте формулы (1), ее практическая реализация требует тщательного планирования или прогнозирования затрат в условиях меняющихся факторов как внешней так и внутренней среды: разрыв отношений со странами ЕС и США – затрудняет полную комплектацию ТПС, развитие отношений с Китаем – потребовало модернизации Байкало-Амурской магистрали и обновления ТПС, увеличение его мощности и повышения его надежности, внутренние проблемы экономики – рост процентных ставок, рост цен на топливно-энергетические ресурсы, материалы и комплектующие. Кроме этого, как видно из формулы (1), для расчета таких операционных расходов – эксплуатационных и на ТО и ТР, требуется процесс моделирования эксплуатационной работы ТПС на заданном профиле пути с учетом фактора повышения среднего веса поезда и вождения тяжеловесных поездов, неполновесных поездов, решение тормозной задачи, а также знание межремонтных пробегов за весь жизненный цикл ТПС, что достаточно трудоемко и требует специальных знаний и практик как в области моделирования, организации и планирования эксплуатационной работы ТПС, тяговых расчетов, так и в области экономики железнодорожного транспорта. В случае же некачественного анализа, планирования и прогнозирования затрат расчет СЖЦ может содержать ошибку, которая в денежном выражении будет исчисляться в сотнях миллионов рублей, а следовательно, может привести к неверным принятым решениям в области

управления жизненным циклом ТПС, что очень актуально в условиях дефицита финансовых ресурсов в железнодорожной отрасли.

Алгоритм практической реализации расчета СЖЦ ТПС представлен на рисунке 2.

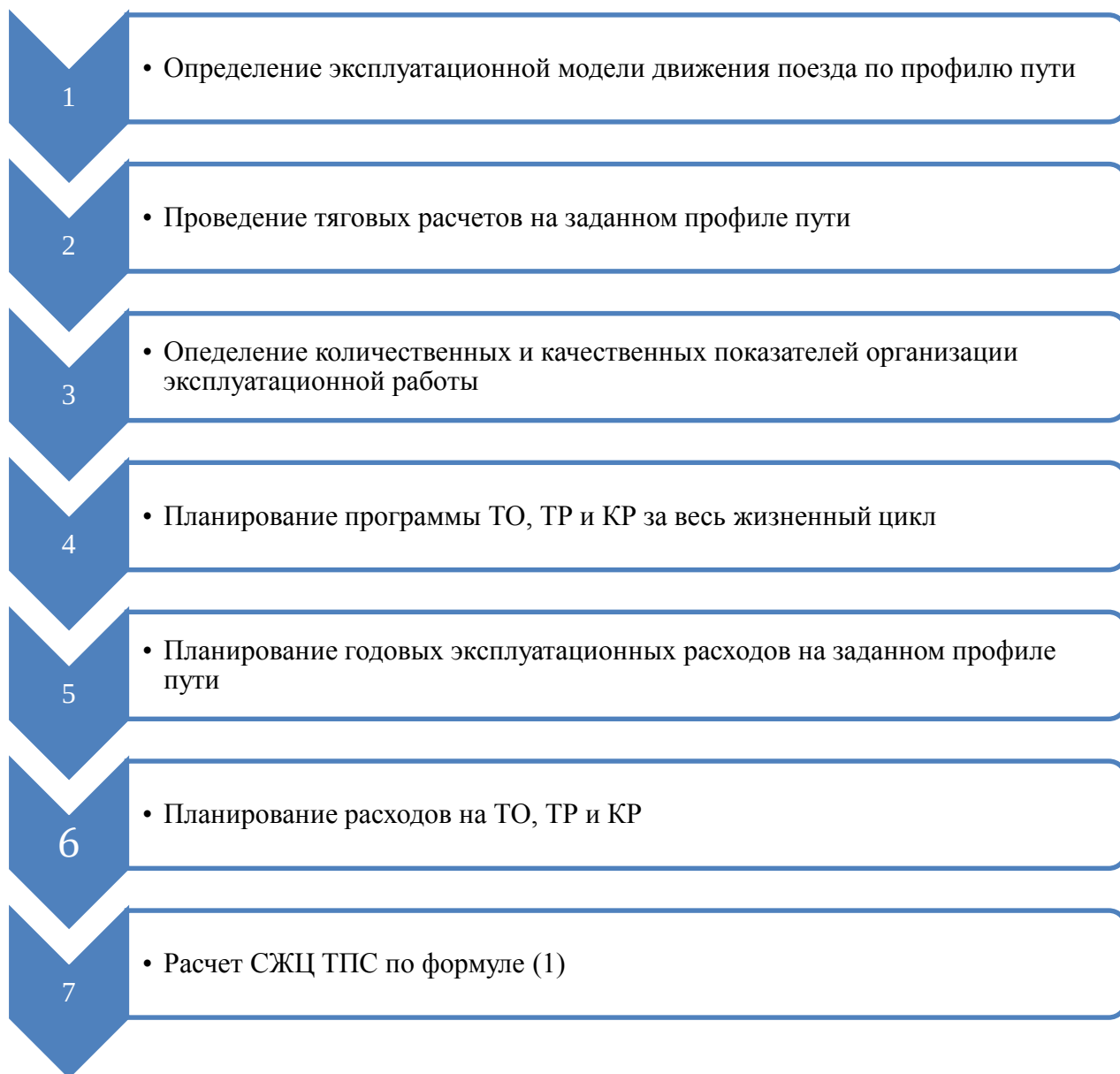


Рис. 2. Алгоритм практической реализации расчета СЖЦ ТПС

Например, для решения задачи определения модели движения поезда по профилю пути необходимо: выбрать тип локомотива, профиль пути, вес поезда, типа вагонов, скорость движения по участку. Эксплуатационные условия для определения СЖЦ для таких ТПС как 2ТЭ116 и 2ТЭ25КМ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Эксплуатационные условия работы ТПС на участке

Наименование показателя	Единицы измерения	Условное обозначение	Значение показателя	
			2ТЭ116	2ТЭ25КМ
1	2	3	4	5
Длина участка	км	L _{уч}	198,5	

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	
Максимальная скорость движения по участку: при чугунных колодках при композиционных колодках	км/ч	$V_{\max}$		
			80	
			90	
Ограничения по скорости при движении по промежуточным станциям	км/ч	$V_{\text{огр}}$	60	
Количество раздельных пунктов, требующих ограничения скорости	-	-	14	
Количество остановок поезда на расчетном участке	-	-	0	
Масса поезда	т	Q	5300	7300
Грузопоток в груженом направлении	млн. т	$\Gamma_{\text{гр}}$	12,8	
Отношение массы поезда нетто к массе брутто	-	γ	0,68	
Среднесуточный пробег локомотива, км/сутки	-	-	500	

Межремонтные пробеги технического обслуживания и ремонтов (ТОиР) представлены в таблице 2.

Таблица 2

Межремонтные пробеги технического обслуживания и ремонтов для ТПС

Межремонтные пробеги технического обслуживания и ремонтов:	Единицы измерения	2ТЭ116	2ТЭ25КМ
КР	тыс.км	1600	2400
СР	тыс.км	800	1200
ТР-3	тыс.км	400	600
ТР-2	тыс.км	200	300
ТР-1	тыс.км	50	75
ТО-3	тыс.км	15	15
ТО-2	ч	72	120

На основании тяговых расчетов [7], определяется расход топлива на тягу на заданном участке поездку.

Методом расчета по статьям и элементам затрат определяются на основании количественных и качественных эксплуатационных показателей годовые операционные расходы ТПС по вариантам [8], а также расходы на ТОиР на основе программы обслуживания и ремонта за весь жизненный цикл (табл.3), что позволяет определить стоимость жизненного цикла как локомотива 2ТЭ116, так и 2ТЭ25КМ (табл. 4).

Как видно из таблицы 4 СЖЦ с учетом коэффициента дисконтирования по вариантам ТПС составит:

- для 2ТЭ116

$$СЖЦ_1 = 12794507,2 \text{ тыс. руб.};$$

- для 2ТЭ25КМ

$$СЖЦ_2 = 11142226,6 \text{ тыс. руб.}$$

Экономический эффект от использования ТПС типа 2ТЭ25КМ на заданном участке по сравнению с 2ТЭ116 составит

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= СЖЦ_1 - СЖЦ_2, \\ \mathcal{E} &= 12794507,2 - 11142226,6 = 1652280,4 \text{ тыс. руб.} \end{aligned} \quad (2)$$

Таблица 3

Программа технического обслуживания и ремонта за весь жизненный цикл ТПС по вариантам

Год	Программа обслуживания и ремонта за жизненный цикл						
40 лет	ТО-2, ч	ТО-3	ТР-1	ТР-2	ТР-3	СР	КР
2ТЭ116							
40 лет	3720	186	58	10	4	2	2
2ТЭ25KM							
40 лет	2880	172	35	7	3	1	1

Таблица 4

Определение СЖЦ ТПС по вариантам

Год	Операционные расходы за жизненный цикл ТПС, тыс. руб.								Инвестиции на приобретение ТПС, тыс. руб.	СЖЦ, тыс. руб.	
Итого за 40 лет	Топливо	Экипировка	Смазка	Оплата труда локомотивных бригад	Ремонт и техническое обслуживание	Плата за выбросы	Песок	Ремонт бандажей колесных пар		Без учета дисконтирования	С учетом дисконтирования
2ТЭ116											
40 лет	921076,0	11264,0	20216,0	420084,0	135175,8	4552,0	106468,0	1276,0	180192,0	1800303,8	12794507,2
2ТЭ25KM											
40 лет	881076,0	11004,0	8456,8	317024,0	140368,3	4476,0	87440,0	1120,0	236000,0	1686965,1	11142226,6

Таким образом, предлагаемый подход определения стоимости жизненного цикла не только позволяет определить наиболее выгодный вариант ТПС на заданном участке, но и позволяет принимать управленческие решения по оптимизации составляющих расходов критерия СЖЦ. Так, например, на основе результатов таблицы 4 были получены диаграммы (рис. 3), из которых видно, что наибольшие элементы затрат СЖЦ ТПС приходятся на топливо, оплату труда локомотивных бригад с учетом страховых взносов, техническое обслуживание и ремонт, что требует организационных, технологических и технических решения по их оптимизации.

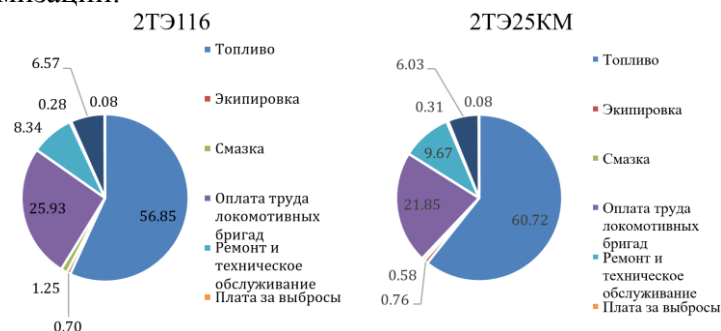


Рис. 3. Элементы операционных расходов СЖЦ ТПС по вариантам

Сегодня на практике, с целью экономии топлива, активно внедряется инновационный ТПС, газотурбовозы, используются новые подходы в нормировании удельного расхода топлива на участках. Нашли активное внедрение полигонные технологии, которые не только сокращают затраты на заработную плату локомотивных бригад, но и оптимизируют расходы на техническое обслуживание локомотивов в пунктах оборота. В определенных условиях реализуется движение поездов с локомотивной бригадой в одно лицо, что также позволяет снизить затраты на оплату труда локомотивных бригад. Предикативная диагностика сегодня позволяет не только сократить расходы на ТОиР, но и сократить простои в ремонте ТПС, повысить безопасность движения.

Список литературы

1. Межгосударственный стандарт ГОСТ 31539-2012. «Цикл жизненный железнодорожного подвижного состава» (введен в действие Приказом Госстандарта № 1171-ст от 26.11.2012) – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097621>.
2. Национальный стандарт РФ ГОСТР 27.202-2012. «Надежность в технике. Управление надежностью. Стоимость жизненного цикла» (введен в действие Приказом Росстандарта № 439-ст от 27.09.2012 г.) – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200102419>.
3. Распоряжение ОАО «РЖД» от 17 марта 2008 г. № 509р «О регламенте определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта» (с изменениями от 02 сентября 2008 г.) – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902110528>.
4. **Валенцева, Е. В.** Использование коэффициента готовности в определении стоимости жизненного цикла тягового подвижного состава/ Валенцева Е. В., Шапшал А. С., Шапшал С. А. // Труды РГУПС, 2024. – №1. С.10-14.
5. **Валенцева Е. В.** К вопросу об оценке стоимости современного тягового подвижного состава на основе технико-эксплуатационных характеристик / Е. В. Валенцева, Т. З. Талахадзе, А. С. Шапшал // Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление. – 2023. – № 1 (152). – С. 43-48. – ISSN 2219-0279.
6. **Валенцева, Е. В.** К вопросу оценке эффективности проектов в области тягового подвижного состава на основе стоимости жизненного цикла/ Е. В.

References

1. Interstate standard GOST 31539-2012. “Life cycle of railway rolling stock” (put into effect by Order of the State Standard No. 1171-st of November 26, 2012) – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097621>.
2. National standard of the Russian Federation GOST R 27.202-2012. “Reliability in engineering. Reliability management. Life cycle cost” (put into effect by Order of Rosstandart No. 439-st dated September 27, 2012) – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200102419>.
3. Order of JSC Russian Railways dated March 17, 2008 No. 509r “On the regulations for determining the life cycle cost and limit price of rolling stock and complex technical systems of railway transport” (as amended on September 2, 2008) – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902110528>.
4. **Valentseva, E. V.** Using the readiness factor in determining the life cycle cost of traction rolling stock / Valentseva E. V., Shapshal A. S., Shapshal S. A. // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2024. - No. 1. P. 10-14.
5. Valentseva E. V. On the issue of assessing the cost of modern traction rolling stock based on technical and operational characteristics / E. V. Valentseva, T. Z. Talakhadze, A. S. Shapshal // Science and education: economy and economics; entrepreneurship; law and management. - 2023. - No. 1 (152). - P. 43-48. - ISSN 2219-0279.
6. **Valentseva, E. V.** On the issue of assessing the effectiveness of projects in the field of traction rolling stock based on life cycle costs / E. V. Valentseva, A. S. Shapshal, S. A.

Валенцева, А. С. Шапшал, С. А. Шапшал // Труды РГУПС, 2021. – №1. – С.4-7.

7. Распоряжение ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р «Правила тяговых расчетов для поездной работы» – URL: <https://docs.cntd.ru/document/557088840>.

8. Валенцева, Е. В. Организация и планирование операционной деятельности эксплуатационного локомотивного депо: учеб.-метод. пособие / Е. В. Валенцева; ФГБОУ ВО РГУПС. - Ростов н/Д : РГУПС, 2021. - 47 с.

Shapshal // Proceedings of RGUPS, 2021. - No. 1. - P. 4-7.

7. Order of JSC Russian Railways dated 12.05.2016 No. 867r “Rules for traction calculations for train operation” – URL: <https://docs.cntd.ru/document/557088840>.

8. Valentseva, E. V. Organization and planning of operational activities of an operational locomotive depot: training and methodological manual / E. V. Valentseva; Rostov-on-Don: RGUPS, 2021. - 47

E. V. Valentseva, S. A. Shapshal, A. S. Shapshal

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF CALCULATION OF THE LIFE CYCLE COST OF TRACTION ROLLING STOCK AND ITS USE FOR THE PURPOSES OF COST OPTIMIZATION

Abstract. Using the example of the proposed model of freight train movement with a given track profile and different series of traction rolling stock with given technical characteristics, the practice of determining the life cycle cost of traction rolling stock by options was implemented. Examples of using the obtained results to optimize the life cycle costs of traction rolling stock are also given.

Keywords: life cycle, traction rolling stock, life cycle cost, effect, cost optimization.

For citation: Valentseva, E. V. Practical Implementation of Calculation of the Life Cycle Cost of Traction Rolling Stock and its Use for the Purposes of Cost Optimization / E. V. Valentseva, S. A. Shapshal, A. S. Shapshal // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 77–83. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_77.

Сведения об авторах

Валенцева Елена Викторовна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Экономика, учет и анализ»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: e.valentseva@gmail.com

Шапшал Сергей Александрович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
доцент,
e-mail: serega-don@bk.ru

Шапшал Александр Сергеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: llh@rgups.ru

Information about the authors

Valentseva Elena Victorovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Economics, Accounting and Analysis»,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: e.valentseva@gmail.com

Shapshal Sergey Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Traction Rolling Stock»,
Associate Professor,
e-mail: serega-don@bk.ru

Shapshal Alexander Sergeevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Traction Rolling Stock»,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: llh@rgups.ru

В. А. Ваулин, А. В. Муратов

ГИБРИДНАЯ ТЯГОВАЯ СИСТЕМА ЛОКОМОТИВА

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные вопросы применения тепловизионной диагностики для оценки технического состояния дизельных двигателей тепловозов. Проанализированы физические основы метода, ключевые объекты контроля и типичные термические аномалии. Особое внимание уделено практическим аспектам проведения измерений, интерпретации термограмм и интеграции тепловизионного контроля в систему планово-предупредительного ремонта тягового подвижного состава. Показана экономическая эффективность метода, заключающаяся в предотвращении внезапных отказов и сокращении затрат на восстановительный ремонт.

Ключевые слова: бесконтактная тепловизионная диагностика, тепловизионный контроль дизельных двигателей, диагностика тепловозов, инфракрасная термография, неразрушающий контроль тепловозного оборудования, дизельный двигатель тепловоза, термограмма двигателя.

Для цитирования: Ваулин, В. А. Бесконтактная тепловизионная диагностика дизельных двигателей тепловозов / В. А. Ваулин, А. В. Муратов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 84–90. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_84.

Введение. Усложнение конструкции локомотивов приводит к снижению их надежности. Чтобы этого не происходило, конструкторам приходится увеличивать надежность отдельных деталей, узлов, аппаратов или дублировать и защищать их. Это ведет к увеличению объема контрольных работ при ремонте и требует повышения их эффективности. Согласно исследованиям, более 50 % операций при техническом обслуживании приходятся именно на контрольные работы. Так же 25 % времени при техническом обслуживании расходуется на выявление неисправного узла, 40 % - на поиск дефекта внутри этого узла и только лишь оставшиеся 35 % - на непосредственно ремонт [1, 2].

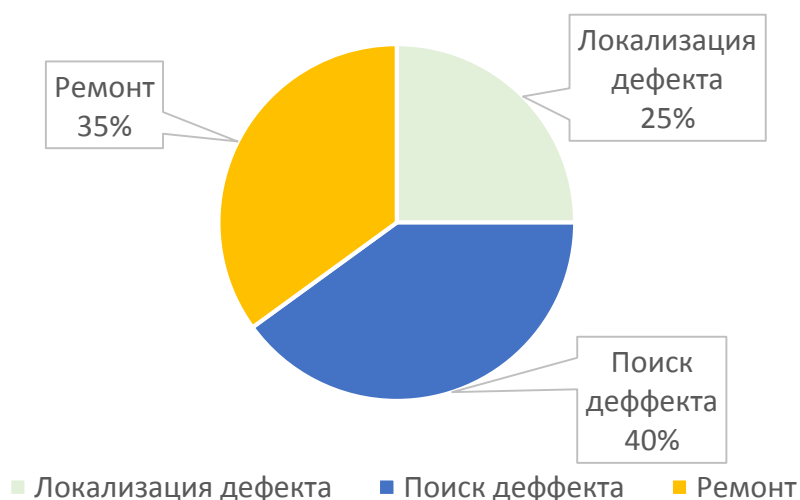


Рис. 1. Диаграмма распределения времени операций

Дизельный двигатель является сложным и высоконагруженным агрегатом, отказ которого может повлечь за собой значительные экономические потери и задержки в графике движения поездов. Традиционные методы диагностики, такие как виброакустический контроль, лабораторный химический анализ моторного масла и замеры параметров работы, требуют непосредственного контакта с оборудованием и довольно часто частичной или полной разборки узлов и агрегатов, но даже при выполнении всех этих условий не всегда позволяют выявить дефекты на ранней стадии их развития.

В этих условиях бесконтактная тепловизионная диагностика представляет собой инструмент предиктивного (прогнозирующего) обслуживания. Тепловизор, регистрирующий невидимое инфракрасное излучение поверхности объектов, позволяет визуализировать распределение температур в реальном времени. Поскольку большинство неисправностей в дизельном двигателе сопровождаются локальным изменением теплового поля: перегревом или аномальным охлаждением- тепловизионный метод диагностики становится незаменимым для быстрого и точного выявления скрытых дефектов.

Цель данной статьи – детально разобрать методологию тепловизионной диагностики дизельных двигателей тепловозов, определить круг решаемых задач и сформулировать практические рекомендации по ее дальнейшему внедрению.

Разрушающие узлы и агрегаты процессы в большей своей части являются тепловыми, то есть скорость разрушения непосредственно связана с температурой. Поэтому для анализа данных процессов необходимо проведение теплового мониторинга. Допустимые температуры для узлов и агрегатов тепловоза приведены в нормативно- технической документации. Современные системы в основном измеряют только температуру масла и охлаждающей жидкости, перегрев которых говорит о неисправности и требует срочной остановки дизеля. Но для определения критических состояний требуется не только регистрировать температуру в текущий момент, но и скорость нарастания температурного градиента. Каждому типу тепловоза соответствуют некоторые критические значения такого градиента, при которых наступают предельные состояния нагрева масла и охлаждающей жидкости [3].

Физические основы и преимущества метода: в основе тепловизионного контроля лежит принцип, согласно которому любое тело, температура которого превышает абсолютный ноль (-273°C), излучает электромагнитные волны в инфракрасном диапазоне. Интенсивность этого излучения напрямую связана с температурой поверхности объекта согласно законом Стефана-Больцмана.

Тепловизор, по сути, является высокочувствительной камерой, которая преобразует невидимое человеческим глазом инфракрасное излучение в видимое изображение, называемое термограммой. На термограмме каждому значению температуры присваивается определенный цвет, что позволяет наглядно оценить тепловую картину.

Ключевые преимущества тепловизионной диагностики для тепловозных дизелей:

1. Бесконтактность и безопасность. Измерения проводятся на расстоянии, что исключает риск для персонала при работе с горячими, движущимися или находящимися под высоким напряжением частями и агрегатами.

2. Оперативность контроля и высокая скорость сканирования. Процесс обследования занимает минуты, что позволяет проверять двигатели избегая длительных простоев.

3. Возможность диагностики труднодоступных узлов. Тепловизор позволяет контролировать температуру элементов, скрытых в кожухах или расположенных в плотной компоновке двигателя.

4. Высокая информативность. Термограмма предоставляет не точечные, а площадные данные о распределении температуры, выявляя зоны с аномальным градиентом.

5. Документирование результатов. Каждая термограмма сохраняется с привязкой ко времени и дате, что позволяет отслеживать динамику развития дефекта и формировать архив технического состояния.

Основные объекты тепловизионного контроля и типичные дефекты: тепловизионное обследование дизельного двигателя тепловоза целесообразно проводить на установившемся режиме работы, когда температура основных узлов достигла рабочих значений.

Ключевыми объектами контроля являются:

Система охлаждения: Радиатор и патрубки: Тепловизор легко выявляет засорение сот радиатора, что проявляется в виде локальных "холодных" зон на фоне нагретой поверхности. Аналогично диагностируются расслоения в патрубках, их перегибы или внутренние отложения, препятствующие нормальной циркуляции охлаждающей жидкости (рис. 2). Водяная рубашка цилиндров: Неравномерный нагрев блоков цилиндров может указывать на образование воздушных пробок или известковых отложений в рубашке охлаждения, что ухудшает теплоотвод и ведет к локальному перегреву.

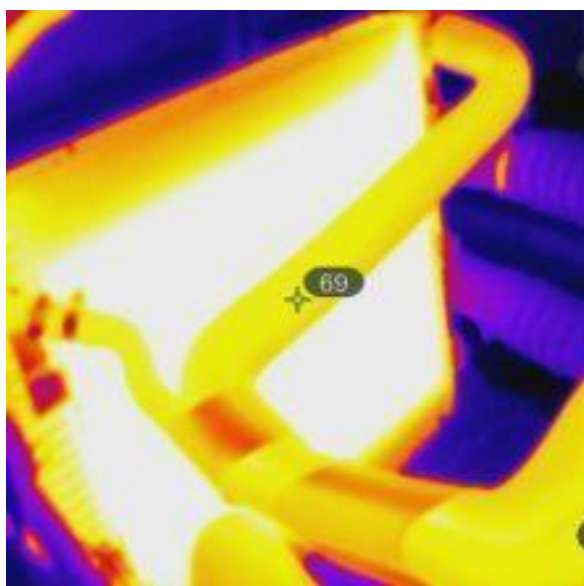
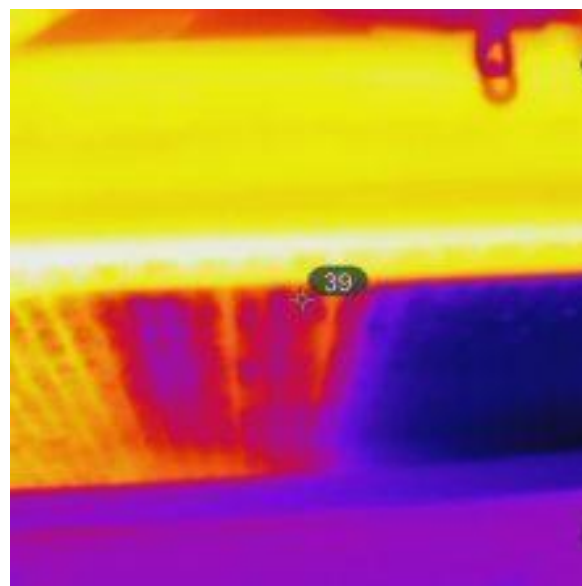
**а****б**

Рис. 2. Термограммы работы радиаторов охлаждения дизельного двигателя:

- а – Термограмма работоспособного радиатора (равномерный прогрев всего радиатора);
б – Термограмма радиатора, работающего с отклонениями (неравномерный прогрев в связи с засорением сот).

Система выпуска отработавших газов: Выпускные коллекторы и турбокомпрессор: тепловизор позволяет оценить равномерность температуры на выходе из каждого цилиндра. Существенное отклонение температуры одного из коллекторов свидетельствует о неисправности в конкретном цилиндре: нарушении угла опережения впрыска, износе форсунки, снижении компрессии или прогаре клапана. Перегрев подшипникового узла турбокомпрессора — прямой признак его скорого выхода из строя. Соединения и фланцы: Утечки отработавших газов через неплотности проявляются на термограмме как четко локализованные очаги с высокой температурой (рис. 3). Система топливоподачи: Топливные форсунки: Перегрев форсунки может быть вызван нарушением распыления топлива, его подтеканием или закоксовыванием. Сравнительный анализ температуры всех форсунок помогает идентифицировать неисправный элемент (рис. 4). Топливопроводы высокого

давления: локальный нагрев на магистрали может указывать на повышенное внутреннее сопротивление или начало кавитационного разрушения (рис. 5)

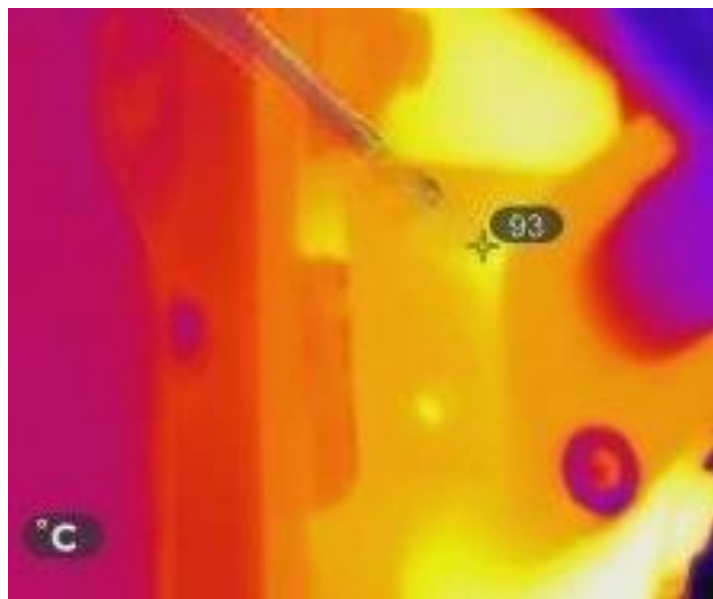


Рис. 3. Утечка выхлопных газов из-под прокладки, выраженная на термограмме местом локального перегрева

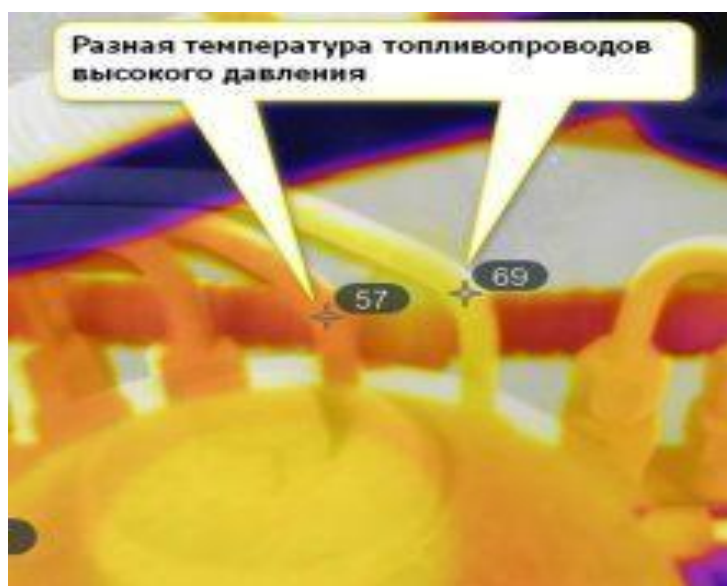


Рис. 4. Термограмма топливной рейки дизельного двигателя с значительно отличающейся температурой форсунок

Цилиндро-поршневая группа (ЦПГ) и система смазки. Наружная поверхность блока цилиндров: хотя прямой доступ к гильзам затруднен, косвенно о состоянии ЦПГ можно судить по тепловой картине блока. Локальные перегревы могут быть связаны с залеганием поршневых колец или нарушением теплоотвода. Поддон картера и маслопроводы: тепловизор помогает выявить утечки моторного масла, которые видны как потеки с температурой, отличной от окружающего металла.

Вспомогательное оборудование двигателя: Генератор, вентилятор охлаждения и элементы их привода: с помощью тепловизионного контроля можно выявить, перегрев подшипников, приводных ремней, муфт и шкивов (рис. 6)

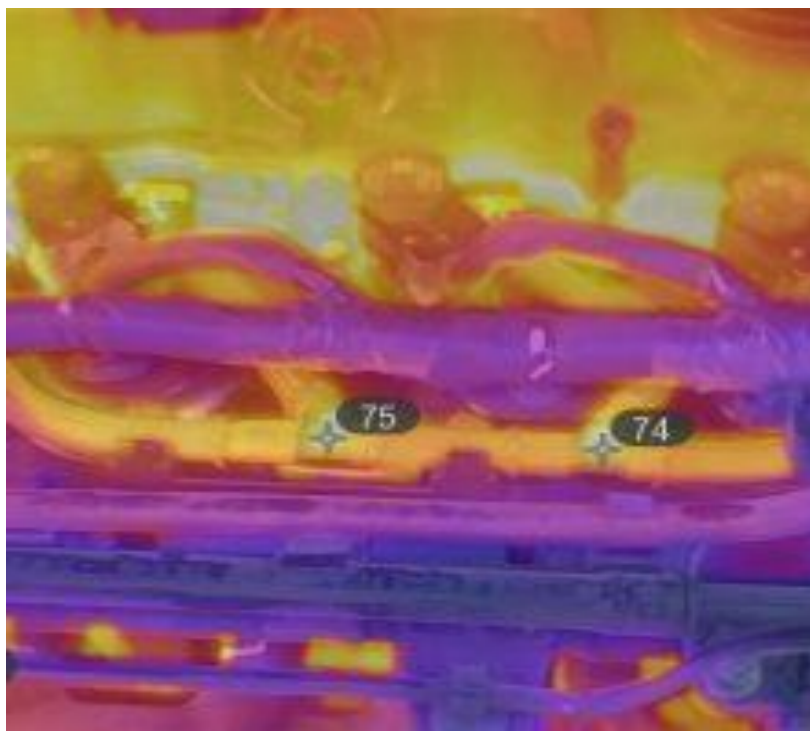


Рис. 5. Перегрев трубки возвратной магистрали дизельного топлива

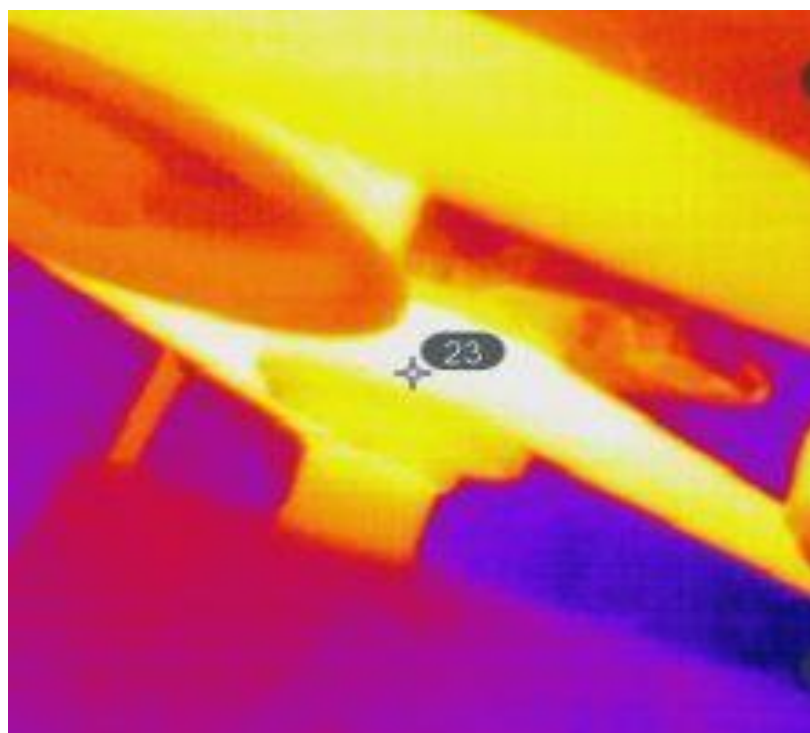


Рис. 6. Термограмма привода вспомогательного оборудования дизельного двигателя, выраженное в локальном перегреве ремня и шкива

Методика проведения обследования и интерпретация полученных данных: для получения достоверных результатов необходимо соблюдать определенный регламент.

Подготовка к обследованию: Обеспечить доступ к двигателю, по возможности сняв защитные кожухи. Очистить поверхности от толстого слоя грязи и масляных отложений, так как они искажают термограмму. Установить двигатель на номинальный режим работы и дождаться выхода на стабильный тепловой режим. Учесть внешние условия: избегать прямого солнечного света, попадания осадков и сильного ветра.

Проведение съемки: Обследование каждого узла проводится с нескольких ракурсов для полноты охвата. Настройки тепловизора (коэффициент эмиссии, отраженная температура, влажность, расстояние) должны быть корректно заданы. Низкий коэффициент эмиссии окрашенных металлических поверхностей может привести к большой погрешности в измерениях. Для каждого узла сохраняется термограмма с вынесенными точками и областями измерения (максимум, минимум, среднее значение).

Анализ термограмм: Основной принцип – сравнительный анализ. Температуру однотипных узлов (например, всех выпускных коллекторов) сравнивают между собой. Разброс более 10-15% считается признаком аномалии. Анализируется не только абсолютное значение температуры, но и форма, размер и локализация тепловой аномалии. Резкая граница между горячей и холодной зоной часто указывает на внутреннюю проблему. Данные тепловизионного контроля не являются абсолютным диагнозом. Они указывают на наличие проблемы, которую затем необходимо подтверждать с помощью других методов диагностики.

Экономическая эффективность и интеграция в систему ТО и ТР:

Внедрение тепловизионной диагностики в процесс технического обслуживания и ремонта тепловозов поможет значительно снизить время на диагностику и локализацию неисправностей, тем самым значительно сократиться время простоя тепловозов. Так же стоит отметить возможность предотвращения возникновения вторичных повреждений. Например, своевременное обнаружение течи охлаждающей жидкости предотвращает перегрев и коробление головки блока цилиндров. Общее сокращение затрат на ремонт тепловозов. Планово-предупредительный ремонт на основе данных диагностики, всегда дешевле ремонта вследствие отказа.

Заключение. Бесконтактная тепловизионная диагностика дизельных двигателей тепловозов представляет собой уникальный по сочетанию оперативности, безопасности и информативности неразрушающий метод контроля, дающий возможность визуализировать тепловые процессы, протекающие внутри агрегата, без его разборки позволяет выявлять широкий спектр дефектов на ранней стадии и предотвратить полный отказ. Дальнейшее развитие метода связано с автоматизацией сбора и анализа термограмм и возможной интеграцией тепловизионных систем в систему бортовой диагностики подвижного состава для мониторинга тепловых процессов в реальном времени в условиях эксплуатации.

Список литературы

1. **Наговицын, В. С.** Разработка алгоритма поиска критических узлов железнодорожного подвижного состава / В. С. Наговицын, А. П. Буйносов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 4. – С. 153-156. – EDN SMYGGN.
2. **Ваулин, В. А.** Применение систем компьютерного зрения на тяговом подвижном составе полигона Горьковской железной дороги / В. А. Ваулин, А. В. Муратов // Дни студенческой науки : Сборник материалов 52-й научной

References

1. **Nagovitsyn, V. S.** Development of an algorithm for searching for critical nodes of railway rolling stock / V. S. Nagovitsyn, A. P. Buynosov // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. - 2014. - No. 4. - P. 153-156. - EDN SMYGGN.
2. **Vaulin, V. A.** Application of computer vision systems on traction rolling stock of the Gorky Railway testing ground / V. A. Vaulin, A. V. Muratov // Days of Student Science: Collection of materials from the 52nd scientific conference of students of

конференции обучающихся ПривГУПС, Самара, 01–25 апреля 2025 года. – Самара: Приволжский государственный университет путей сообщения, 2025. – С. 40–42. – EDN QGDWTV.

3. **Боряк, К. Ф.** Перспективы внедрения температурного мониторинга для диагностики технического состояния механических узлов подвижного тягового железнодорожного состава / К. Ф. Боряк, С. Л. Волков, Е. С. Шпат // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – No 2. – С. 50–53.

Privolzhsky State Transport University, Samara, April 1–25, 2025. – Samara: Volga State Transport University, 2025. – P. 40–42. – EDN QGDWTV.

3. **Boryak, K. F.** Prospects for the implementation of temperature monitoring for diagnostics of the technical condition of mechanical units of rolling stock / K. F. Boryak, S. L. Volkov, E. S. Shpat // Technical diagnostics and non-destructive testing. - 2014. - No. 2. - P. 50-53.

V. A. Vaulin, A. V. Muratov

NON-CONTACT THERMAL IMAGING DIAGNOSTICS OF DIESEL ENGINES OF LOCOMOTIVES

Abstract. The article discusses the current issues of using thermal imaging diagnostics to assess the technical condition of diesel engines in locomotives. It analyzes the physical principles of the method, the key objects of control, and typical thermal anomalies. The article focuses on the practical aspects of measuring, interpreting thermograms, and integrating thermal imaging diagnostics into the preventive maintenance system for traction rolling stock. It demonstrates the economic benefits of the method, including the prevention of sudden failures and reduced costs for repair.

Keywords: non-contact thermal imaging diagnostics, thermal imaging control of diesel engines, diagnostics of diesel locomotives, infrared thermography, non-destructive control of diesel locomotive equipment, diesel locomotive engine, engine thermogram.

For citation: Vaulin, V. A. Non-Contact Thermal Imaging Diagnostics of Diesel Engines of Locomotives / V. A. Vaulin, A. V. Muratov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 84–90. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_84.

Сведения об авторах

Ваулин Владислав Алексеевич

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
аспирант,
e-mail: 78979@stud.samgups.ru

Муратов Алексей Владимирович

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
и. о. заведующего кафедрой,
кандидат технических наук, доцент
e-mail: muratov@samgups.ru

Information about the authors

Vaulin Vladislav Alekseevich

Volga State Transport University (VSTU),
Chair «Traction Rolling Stock»,
Postgraduate Student,
e-mail: 78979@stud.samgups.ru

Muratov Alexey Vladimirovich

Volga State Transport University (VSTU),
Chair «Traction Rolling Stock»,
Head of the Chair,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: muratov@samgups.ru

О. С. Веригин, А. А. Зарифьян

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ КОЛЕСНО-МОТОРНЫХ БЛОКОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УВЕЛИЧЕНИЮ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Аннотация. Представлена обзорная информация по отказам и неисправностям колесных пар магистральных электровозов, на которые могут повлиять электромеханические переходные процессы в виде броском момента тяговых двигателей. Кратко рассмотрено современное состояние научной проработки данного вопроса. Определена актуальность исследований.

Ключевые слова: переходный процесс, магистральный электровоз, колесная пара, бандаж, шестерня, большое зубчатое колесо, тяговый электропривод.

Для цитирования: Веригин, О. С. Перспективные направления исследований динамики колесно-моторных блоков магистральных электровозов применительно к увеличению продолжительности жизненного цикла / О. С. Веригин, А. А. Зарифьян // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 91–96. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_91.

1. Введение

В настоящее время происходит интенсивное увеличение грузопотоков в азиатско-тихоокеанском регионе нашей страны. Задача обеспечения пропускной способности возрастающего грузопотока в данном регионе сформулирована в Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года [1] и является предметом научных изысканий многих российских исследователей [2 – 5].

Основными направлениями научных исследований и опытно-конструкторских разработок в указанных работах являются:

- повышение пропускной способности железнодорожных магистралей;
- оптимизация перемещения грузов с точки зрения логистики.

Также рассматриваются особенности тяжеловесного движения по железнодорожным магистралям, т. е. вождения поездов весом более 7 тысяч тонн.

Ряд крупных исследований посвящен повышению надежности железнодорожного тягового и нетягового подвижного состава. В данных исследованиях рассматриваются повышение эффективности технического обслуживания подвижного состава и поиск новых подходов к конструированию [6 – 8].

2. Отказы механической части колесно-моторных блоков.

В публикациях [9 – 12] проводится статистическое обоснование и исследование отказа колес электровоза 3ЭС5К в виде ослабления натяга и проворота бандажа на колесном центре. По результатам исследования установлено, что данное явление в значительной степени зависит от режима ведения поезда, имеет электромеханическую природу и к провороту бандажа могут привести броски момента тягового двигателя, вызванные внешними нестационарными воздействиями. В качестве внешних нестационарных воздействий в указанных работах рассматриваются: резкое задание тяги, кратковременный отрыв токоприемника от контактного провода, броски напряжения в контактной сети и срывы колесной пары в боксование с последующим восстановлением сцепления колес с рельсами.

Передача крутящего момента от тягового двигателя к колесам происходит через тяговую механическую передачу, представляющую собой систему вращающихся тел. Конструктивно, помимо бандажей, в составе колесно-моторного блока имеется еще ряд элементов, установка которых осуществляется способом соединения с гарантированным

натягом. Речь идет о соединении колесного центра с осью колесной пары, большого зубчатого колеса со ступицей колесного центра и шестерни тягового редуктора с хвостовиком вала тягового двигателя.

Данные по статистике отказов колесно-моторных блоков в соответствии с информацией от электровазоремонтных заводов и сервисных локомотивных депо приведены в таблице. Здесь, также, приведен ряд неисправностей элементов колесной пары, причинами которых тоже являются высокие динамические нагрузки, обусловленные условиями работы электровазоза.

Таблица

Отказы элементов колесно-моторных блоков магистральных электровазозов

№	Вид отказа	Серия электровазоза	Депо приписки
1	Ослабление и сползание малой шестерни с вала тягового двигателя	2,3,4ЭС5К	Хабаровск, Чита, Белогорск, Улан-Уде, Каргалы
2	Ослабление натяга и смещение колесного центра на оси колесной пары	3ЭС4К	Туапсе
3	Смещение большого зубчатого колеса со ступицы колесной пары	3ЭС5К	Хабаровск, Вихоревка
4	Трещины или разрывы в спицах колесных центров	2,3ЭС5К	ДВЖД
5	Трещины по телу большого зубчатого колеса	3,4ЭС5К	Вихоревка, Смоляниново
6	Повышенный износ и изломы зубьев в тяговом редукторе	2,3ЭС5К	Хабаровск, Чита, Вихоревка



а)



б)

Рис. 1. Отказы тяговой передачи электровазоза 3ЭС5К приписки депо г. Хабаровск



а)



б)

Рис. 2. Отказы тяговой передачи и колеса электровоза ЗЭС5К приписки депо г. Хабаровск

Наиболее массовыми из представленных в таблице отказов являются смещения (спрессовки) малой шестерни с вала тягового двигателя (см. рис. 1, а). Проблема часто обусловлена такими причинами, как отсутствие смазки или некачественная установка шестерни. Немало случаев спрессовки малой шестерни обусловлены высокими динамическими нагрузками: продольно-динамические реакции поезда, ударные нагрузки при бросках момента. Последствиями спрессовки шестерни является: заклинивание колесно-моторного блока и необходимость его замены в составе электровоза. Нередкими являются отказы в виде повышенного износа и изломов зубьев в тяговом редукторе (см. рис. 1, б, рис. 2, а) и трещин и разрывов в спицах колесных центров (см. рис. 2, б). Исследованиям данного типа отказов посвящен ряд научных работ, в которых рассматривается статическая постановка задачи с применением метода конечных элементов.

Значительно менее массовыми, вплоть до единичных, являются отказы колесно-моторных блоков в виде смещений колесного центра на оси колесной пары и смещение зубчатого колеса со ступицы колесного центра. Не смотря на более редкие проявления указанных отказов, в данных случаях также требуется ремонт электровоза в виде замены колесно-моторного блока. Данная проблематика для магистральных электровозов в научной литературе практически не освещается.

Причины возникновения рассмотренных отказов могут быть технологического характера (качество и технология изготовления деталей, сборки колесно-моторного блока и технического обслуживания в ходе жизненного цикла). Однако, значительное влияние на возникновение данных отказов могут оказывать и факторы, связанные с режимом ведения поезда и работой тягового электропривода.

Заключение.

Как видно из выполненного обзора, помимо проворотов бандажей колесных пар, в работе колесно-моторного блока электровоза существует еще ряд отказов, связанных с нарушением фрикционного соединения элементов конструкции. Данные отказы имеют различную частоту проявления, но могут привести к серьезным последствиям как с точки зрения рентабельности перевозок и своевременности доставки груза, так и с точки зрения безопасности.

В контексте факта приближения значений тяговых усилий, реализуемых современными локомотивами, к пределу несущей способности соединения колесного центра и бандажа

можно спрогнозировать увеличение количества отказов такого рода и в других механических узлах колесно-моторного блока.

В результате выполненного обзора отказов в узлах колесно-моторного блока на примере различных серий электропоездов очевидно, что перспективным и актуальным с точки зрения повышения надежности перевозок является исследование процессов силового взаимодействия во всем тяговом тракте. Комплексное исследование влияния электромеханических переходных процессов в совокупности с другими воздействиями позволит установить значения динамических нагрузок во фрикционных соединениях и определить режимы ведения поезда, для которых характерны те или иные отказы элементов колесно-моторного блока.

Список литературы

1. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г.: утр. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. №3363-р.
2. **Сирина Н. Ф., Раевская П. Е.** Выбор оптимального варианта формирования и регулирования соединенных поездов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2024. №1(61) С. 53 – 61.
3. **Эсаулов В. А., Мединцев Е. В.** О развитии тяжеловесного движения на восточном полигоне // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2025. №1(42). С. 119 – 123.
4. **Левин, Д. Ю.** Логистика перевозочного процесса железных дорог // Транспорт Российской Федерации. № 1-2 (92-93). С. 21-27.
5. **Козлов П. А., Колокольников В. С., Трушин Н. А.** Моделирование международных транспортных коридоров // Транспорт Российской Федерации. 2023. №1-2 (104-105). С. 32 – 37.
6. **Каимов Е. В., Оленцевич А. А.** Усиление пропускных мощностей Восточного полигона за счет увеличения количества длинносоставных поездов // Управление эксплуатационной работой на транспорте (УЭРТ-2024): сборник трудов II Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15 – 16 октября 2024 г. Санкт-Петербург: Изд-во ПГУПС, 2024. С. 44 – 47.
7. **Фрибус, А. А.** О влиянии пропуска поездов повышенной массы и длины на технологические и конструктивные параметры приемоотправочных парков

References

1. Transport Strategy of the Russian Federation for the Period up to 2030 with a Forecast for the Period up to 2035: morning. By Order of the Government of the Russian Federation of November 27, 2021 No. 3363-r.
2. **Sirina N. F., Raevskaya P. E.** Selection of the optimal option for the formation and regulation of connected trains // Bulletin of the Ural State Transport University. 2024. No. 1 (61) pp. 53 – 61.
3. **Esaulov V. A., Medintsev E. V.** On the development of heavy-haul traffic on the eastern range // Transport of the Asia-Pacific Region. 2025. No. 1 (42). P. 119 – 123.
4. **Levin, D. Yu.** Logistics of the transportation process of railways // Transport of the Russian Federation. No. 1-2 (92-93). P. 21-27.
5. **Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Trushin N. A.** Modeling of international transport corridors // Transport of the Russian Federation. 2023. No. 1-2 (104-105). P. 32 – 37.
6. **Kaimov E. V., Olentsevich A. A.** Strengthening the throughput capacity of the Eastern Polygon by increasing the number of long-trains // Management of operational work in transport (UERT-2024): collection of works of the II International scientific and practical conference, St. Petersburg, October 15-16, 2024. St. Petersburg: Publishing house of PGUPS, 2024. pp. 44-47
7. **Fribus, A. A.** On the influence of the passage of trains of increased mass and length on the technological and design parameters of receiving and departure yards of railway

железнодорожных станций // Наука и молодежь XXI века: материалы Регионального форума. Новосибирск, 13 – 23 ноября 2023 г. В 2 ч. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2024. С 17 – 21.

8. **Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Измеров О. В., Карпов А. Е.** Техническая инновационика и ее применение в транспортном машиностроении // Известия Транссиба. – 2024. – №3(59). – С. 21 – 32.

9. **Веригин О. С., Зарифьян А. А.** Анализ статистики проворотов бандажей колесных пар магистральных электровозов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – №4. – С. 49 – 54.

10. **Веригин О. С., Зарифьян А. А., Плис В. И.** Исследование электромеханических процессов в тяговом приводе магистрального грузового электровоза переменного тока с учетом влияния контактной сети // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – №4(84). – С. 44 – 55.

11. **Веригин О. С., Зарифьян А. А.** Анализ причин, влияющих на надежность колесных пар магистральных грузовых электровозов // ELTRANS-2023. Электрификация и электрическая тяга: цифровая трансформация железнодорожного транспорта: сборник трудов XI Международного симпозиума. – Санкт-Петербург, 31 мая – 2 июня 2023 года, с. 108 – 115.

12. **Веригин, О. С.** Влияние электромеханических процессов в тяговом электроприводе магистрального электровоза переменного тока на надежность и долговечность колесных пар: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Веригин Олег Сергеевич. Ростов-на-Дону, 2024, 138 с.

stations // Science and youth of the 21st century: materials of the Regional Forum. Novosibirsk, November 13–23, 2023. In 2 parts. Novosibirsk: Publishing house of SUSPS, 2024. P. 17–21.

8. **Kosmodamiansky A. S., Vorobyov V. I., Izmerov O. V., Karpov A. E.** Technical innovation and its application in transport engineering // Izvestiya Transsib. - 2024. - No. 3 (59). - P. 21 - 32.

9. **Verigin O. S., Zarifyan A. A.** Analysis of statistics of wheel tread rotations on mainline electric locomotives // Bulletin of the Rostov State Transport University. - 2019. - No. 4. - P. 49 - 54.

10. Verigin O. S., Zarifyan A. A., Plis V. I. Study of electromechanical processes in the traction drive of a mainline AC freight electric locomotive taking into account the influence of the contact network // Bulletin of the Rostov State Transport University. - 2021. - No. 4 (84). - P. 44 - 55.

11. Verigin O. S., Zarifyan A. A. Analysis of factors affecting the reliability of wheelsets of mainline freight electric locomotives // ELTRANS-2023. Electrification and electric traction: digital transformation of rail transport: collection of proceedings of the XI International Symposium. - St. Petersburg, May 31 - June 2, 2023, P. 108 - 115.

12. Verigin, O. S. The influence of electromechanical processes in the traction electric drive of an AC mainline electric locomotive on the reliability and durability of wheelsets: dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Verigin Oleg Sergeevich. Rostov-on-Don, 2024, 138 p.

O. S. Verigin, A. A. Zarifyan

PROMISING AREAS OF RESEARCH ON THE DYNAMICS OF WHEEL-MOTOR BLOCKS OF MAIN ELECTRIC LOCOMOTIVES IN RELATION TO INCREASING THE LIFE CYCLE

Abstract. Overview information on failures and malfunctions of wheelsets of main electric locomotives, which may be affected by electromechanical transients in the

form of torque of traction engines, is presented. The current state of scientific study of this issue is briefly considered. The relevance of research has been determined.

Keywords: transient process, main electric locomotive, wheelset, bandage, gear, large gear wheel, traction electric drive.

For citation: Verigin, O. S. Promising Areas of Research on the Dynamics of Wheel-Motor Blocks of Main Electric Locomotives in Relation to Increasing the Life Cycle / O. S. Verigin, A. A. Zarifyan // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 91–96. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_91.

Сведения об авторах

Веригин Олег Сергеевич

Южно-Российский государственный
политехнический университет им. М. И.
Платова (ЮРГПУ (НПИ)),
кафедра «Электроснабжение и
электропривод»,
кандидат технических наук,
старший преподаватель,
e-mail: fta09@bk.ru

Зарифьян Александр Александрович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: zarifian_aa@mail.ru

Information about the authors

Verigin Oleg Sergeevich

South Russian State Polytechnic University
named M. I. Platov (YRSPU (NPI)),
Chair «Power Supply and Electric Drive»,
Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer,
e-mail: fta09@bk.ru

Zarifyan Alexander Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Traction Rolling Stock»,
Doctor of Technical Sciences,
Professor,
e-mail: zarifian_aa@mail.ru

А. В. Кириллов, А. А. Чучин

АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ В ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДАХ

Аннотация. В настоящей статье проведен анализ существующих методов математического моделирования в задачах расчета пневматических процессов, возникающих в режиме торможения или отпуска тормозов в грузовых поездах.

Ключевые слова: пневматическое торможение, грузовые поезда, продольные динамические силы, математическое моделирование, методы.

Для цитирования: Кириллов, А. В. Анализ методов математического моделирования пневматических процессов при торможении в грузовых поездах / А. В. Кириллов, А. А. Чучин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 97–101. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_97.

Увеличение грузооборота по железным дорогам РФ требует внедрение перспективного грузового подвижного состава. На период 2020–2025 года отмечено значительное разнообразие новых тяговых и нетяговых единиц подвижного состава, сконструированных для конкретных задач выполнения плана грузовых перевозок страны. На этапе проектирования нового подвижного состава составляют математические модели, имитирующие поведение реального поезда в различных условиях движения. Особое внимание уделяют процессам, протекающим в грузовых поездах в режиме торможения и отпуска. Таким образом, для начала разработок нового подвижного состава необходимо составление технического задания (ТЗ) на конкретный проектируемый поезд. Для составления и последующей корректировки ТЗ необходимо на начальном этапе выполнять расчеты на комплексной математической модели поезда. Точность, качество синтезируемых параметров и ожидаемые характеристики зависят от выбранных методов моделирования. В настоящей работе основной целью стоит систематизация и анализ существующих методов математического моделирования пневматических процессов в грузовых поездах, влияющих на состояние поезда как общей системы с постоянно меняющимися параметрами в режимах торможения и отпуска.

Метод Навье-Стокса

Физической основой в моделировании нестационарных процессов в тормозной магистрали служат уравнения газодинамики, происходящие из классических уравнений Навье-Стокса. Данные уравнения описывают распространение тормозной волны с учетом сжимаемости воздуха, сил трения и инерционности потока. Однако, ввиду значительной вычислительной сложности решения полной системы, в инженерной практике для моделирования процессов в тормозной магистрали поезда часто применяют их упрощенные формы.

Уравнение, выведенное французским физиком Анри Навье и британским математиком Джорджем Стоксом

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f},$$

где $\vec{v}$ – векторное поле скорости, м/с;

t – время, с;

∇ – оператор набла;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

Δ – векторный оператор Лапласа;

ρ – плотность, кг/м³;

p – давление, Па;

$\vec{f}$ – векторное поле массовых сил, м²/с.

Изначально, описываемое уравнение предназначалось для моделирования процессов несжимаемой жидкости в векторном формате. Позднее уравнение было адаптировано под одномерное течение по трубопроводу сжимаемого газа. Метод Навье-Стокса применяют для моделирования распространения воздушной волны в тормозной магистрали (ТМ), учитывающий инерционность воздушного потока, возникающие при течении воздуха силы трения в элементах длины воздуховода (ЭДВ) [1]

$$\frac{\partial P}{\partial t} = c_0 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - Q(x) + \Delta P \left(P, \frac{\partial P}{\partial t} \right),$$

$$c_0 = \frac{c^2}{2a},$$

где P – давление воздуха в ТМ, Па;

c – скорость звука в воздушном потоке, м/с;

t – время, с;

x – координата вдоль длины состава, м;

$Q(x)$ – функция описания интенсивности распределенных утечек воздуха в ТМ вдоль координаты x , кг/м·с;

ΔP – изменение давления в тормозной магистрали, возникающее от влияния воздухораспределителя (ВР) и его состояния в текущий момент времени, Па;

a – коэффициент, характеризующий сопротивление движению воздушного потока, учитывающий трение воздуха о ЭДВ.

Основное преимущество метода заключается в адекватном физическом описании процесса распространения тормозной волны по составу, включая учёт трения, инерционности потока и сжимаемости воздуха. К недостаткам можно отнести сложность интеграции в модель, которая должна учитывать отдельные элементы магистрали и приборов. Данный метод применяется для решения частных научно-исследовательских задач и служит физической основой для построения и последующей верификации более простых математических моделей.

Для задач, требующих детального пространственного разрешения, широко применяется метод сосредоточенных параметров, представляющий собой компромисс между точностью и вычислительной эффективностью.

Метод сосредоточенных параметров

В основу этого метода положено представление тормозной системы как совокупности дискретных объемов (резервуары, участки тормозной магистрали). ЭДВ рассматривается в качестве изолированной емкости, в которой существующее давление одинаковое во всех точках. Основываясь на уравнениях термодинамики [2], выражение изменения массы воздуха для до критического режима течения воздуха

$$\frac{G}{dt} = \mu S \sqrt{\frac{2g\gamma}{\gamma+1} \cdot \frac{P_v}{v_v} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{2}{\gamma-1}}} \quad \text{при} \quad \frac{P_n}{P_v} \leq 0,528,$$

где G – масса воздуха в резервуаре, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

t – время, с;

ν_v – удельный объем воздуха при давлении P_v , м³/кг;

γ – отношение теплоемкости воздуха при постоянном давлении к теплоемкости воздуха при постоянном объеме.

Для докритического режима течения воздуха

$$\frac{G}{dt} = \mu S \sqrt{\frac{2g\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{P_v}{\nu_v} \left[\left(\frac{P_n}{P_v} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_n}{P_v} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \text{ при } \frac{P_n}{P_v} > 0,528,$$

Критическое давление $0,528P_v$.

Массовый расход воздуха в атмосферу описывает следующее выражение из термодинамики

$$q = \text{Sign} \cdot \mu F \cdot \frac{P_1}{R \cdot T_1} \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot T_1 \cdot \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]},$$

где μF – площадь сечения отверстия с учетом коэффициента расхода воздуха, м²;

P_1, P_2 – давление воздуха на входе и выходе из отверстия, Па;

T_1, T_2 – температура воздуха на входе и выходе из отверстия, К;

R – универсальная газовая постоянная, м²/с²·К;

k – показатель адиабаты воздуха.

Основным преимуществом описанного метода является его универсальность и высокая точность в задачах моделирования пневматических процессов в тормозной магистрали поезда. При разделении на отдельные сегменты, имеется возможность гибкой настройки параметров конкретных участков ТМ. Таким образом данный метод демонстрирует соотношения «точность – производительность» для решения множества задач в моделировании пневматических процессов в поезде. Применение метода ориентировано на внедрение в многомассовые математические модели поезда, комплексный анализ процессов продольной динамики при торможении, а также для синтеза параметров и алгоритмов систем управления пневматическими тормозами поезда.

Статический и квазистатический метод

В основе данного метода положены способы аппроксимации и линеаризации сложных нелинейных зависимостей с фиксацией временных параметров. При выполнении расчетов данным методом не требуется точное математическое описание переходных процессов. Основная цель ориентирована на получение практических и прогнозных оценок. Примером можно привести данные из [3] рис. 1.

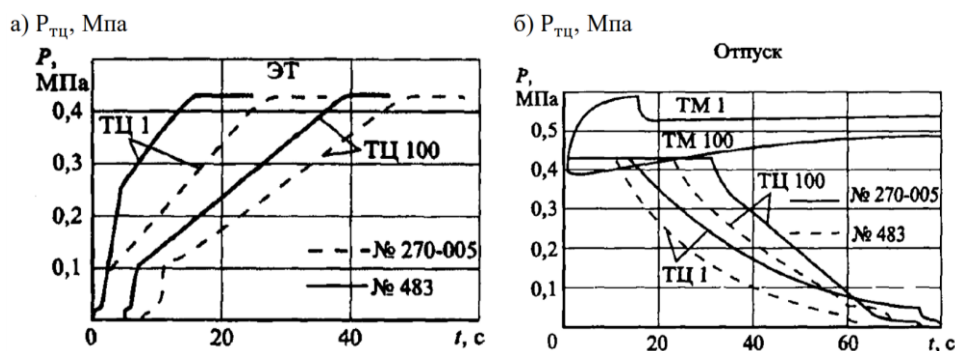


Рис. 1. Характеристики наполнения (а) и опорожнения (б) тормозных цилиндров вагонов в грузовом составе с ВР №483 [3]

В работе [4] была проведена аппроксимация экспериментально полученных графиков и выведены аналитические зависимости, описывающие процесс наполнения и опорожнения давления в тормозном цилиндре вагона.

$$P_1 = e^{\left(-\frac{t}{T_1}\right)} \cdot P_0,$$
$$P_2 = e^{\left(-\frac{(t-26)}{T_2}\right)} \cdot e^{\left(-\frac{26}{T_1}\right)} \cdot P_0,$$

где t – время, с;

T_1, T_2 – постоянные времени, определенные на основании экспериментальных данных [4].

В отличие динамической модели Навье-Стокса и метода сосредоточенных параметров, где выполняется решение дифференциальных уравнений, для описания сложных переходных процессов в ТМ, статические и квазистатические методы используют готовые зависимости, полученные экспериментальным путем и нормативные табличные данные.

Основное преимущество статических и квазистатических методов заключается в высокой скорости вычислений и наглядности результатов, что достигается за счет использования аппроксимированных зависимостей и нормативных данных. Это делает их незаменимым инструментом на начальных стадиях проектирования для проведения предварительных и поверочных расчетов, а также для задач, не требующих детальное разрешение быстропротекающих процессов в реальном времени.

Проведенный анализ методов математического моделирования пневматических процессов в режимах торможения и отпуска грузовых поездов позволил систематизировать и оценить преимущества и недостатки каждого. Данная классификация упрощает выборку методики расчетов под конкретную задачу (проектирование нового оборудования, оценка параметров сложных моделей или же получение начальных параметров и характеристик из нормированных данных).

При проектировании нового подвижного состава в частных случаях используют именно многомассовые модели поезда, учитывающие изменение продольной динамики всего поезда в режимах торможения и отпуска.

Для предварительного составления ТЗ и получения основных параметров поезда наиболее эффективно применение статических и квазистатических методов. Для комплексного моделирования на этапе детального проектирования пневматических компонентов рекомендуется применять метод сосредоточенных параметров. Метод Навье-Стокса, в силу своей вычислительной сложности, рекомендуется к применению для углубленного анализа и верификации полученных результатов.

Список литературы

1. Карминский, Д. Э. Теоретический расчет изменения давления в тормозной магистрали с учетом утечек воздуха / Д. Э. Карминский, К. Д. Шевченко // Труды РИИЖТ, 1974. Вып. 104. – С. 80–87.
2. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1: Учеб руководство: для вузов. – 5 изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. Лит, 1991. – 600 с. – ISBN 5-02-014015-5.

References

1. Karminsky, D. E. Theoretical calculation of pressure changes in the brake line taking into account air leaks / D. E. Karminsky, K. D. Shevchenko // Trudy of the Russian Institute of Railway Transport, 1974. Issue 104. – P. 80–87.
2. Abramovich, G. N. Applied Gas Dynamics. In 2 parts. Part 1: Textbook: for universities. - 5th ed., revised and enlarged. - Moscow: Nauka. Ed. in Chief Phys-Math. Literature, 1991. - 600 p. - ISBN 5-02-014015-5.

3. Асадченко, В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. – Москва: Маршрут, 2006. – 392 с.

4. Пудовиков, О. Е. Автоматическое управление пневматическим тормозом грузового поезда / О. Е. Пудовиков, Г. М. Менакер // Интеллектуальные транспортные системы: материалы II Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы» (25 мая 2023 г.) – Москва: РУТ (МИИТ), 2023. – М. Издательство Перо, 2023. – С. 322–329.

3. Asadchenko, V. R. Automatic brakes of rolling stock: a textbook for universities of railway transport. – Moscow: Route, 2006. – 392 p.

4. Pudovikov, O. E. Automatic control of the pneumatic brake of a freight train / O. E. Pudovikov, G. M. Menaker // Intelligent transport systems: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference "Intelligent Transport Systems" (May 25, 2023) - Moscow: RUT (MIIT), 2023. - M. Pero Publishing House, 2023. - P. 322-329.

A. V. Kirillov, A. A. Chuchin

ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELING METHODS FOR PNEUMATIC PROCESSES DURING BRAKING IN FREIGHT TRAINS

Abstract. This article analyzes the existing methods of mathematical modeling in the problems of calculating pneumatic processes that occur during braking or releasing the brakes in freight trains.

Keywords: pneumatic braking, freight trains, longitudinal dynamic forces, mathematical modeling, and methods.

For citation: Kirillov, A. V. Analysis of Mathematical Modeling Methods for Pneumatic Processes during Braking in Freight Trains / A. V. Kirillov, A. A. Chuchin // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 97–101. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_97.

Сведения об авторах

Кириллов Андрей Владимирович

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
аспирант
e-mail: orgrimmaris@mail.ru

Чучин Антон Александрович

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: chuchin_anton@mail.ru

Information about the authors

Kirillov Andrey Vladimirovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),
Chair «Electric Trains and Locomotives»
Postgraduate student,
e-mail: orgrimmaris@mail.ru

Chuchin Anton Alexandrovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),
Chair «Electric Trains and Locomotives»
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: chuchin_anton@mail.ru

*И. Н. Ковалёва, А. В. Пигунов, А. Н. Панов, Е. Ю. Ромашова, А. П. Сычев,
В. В. Шубитидзе, Ю. С. Подгорная*

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛОКОМОТИВО-, ВАГОНОСТРОЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА. РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД

Аннотация. Рассмотрен переход от детерминированных, допусковых, статистических и вероятностных парадигм к риск-ориентированной концепции в процессах жизненного цикла на железнодорожном транспорте. Представленный подход направлен на оптимизацию соотношения «качество – цена – риски», что способствует повышению конкурентоспособности во всей машиностроительной отрасли. Проведен анализ актуальных проблем, рассматриваются возможные пути развития методологии, а также модели и методы обоснования допустимости конструкторско-технологических рисков в области железнодорожной техники и системы в целом. Представлены примеры формирования риск-ориентированной стратегии и тактики этапов процессов жизненного цикла – проектирование и поддержание работоспособности, для объекта подвижного состава – замены основных узлов трения на примере пятник-подпятник, минимизирующей риски отказов в пути.

Ключевые слова: риск-ориентированный подход, железнодорожный транспорт, узлы трения, пятник-подпятник.

Для цитирования: Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава. Риск-ориентированный подход / И. Н. Ковалева, А. В. Пигунов, А. Н. Панов и др. // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 102–110. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_102.

Развитие железнодорожного транспорта как части системы машиноведения и машиностроения в целом исторически направлена на оптимизацию ресурсопотребления [1, 2], в том числе при входящем контроле и проведении испытаний [3]; на совершенствование конструкторско-технологических методов качества [4], надёжности и безопасности технических систем и процессов [5]; на изучение причинно-следственных связей деградационных явлений (включая различные механизмы повреждений как отдельных узлов, так и систем в целом) [6]; а также на автоматизацию обработки больших данных с целью сокращения цикла вывода продукции на производство [7, 8].

В последние годы развитие глобальных процессов создания объектов искусственной среды на территории Российской Федерации на национальном уровне осуществляется в соответствии с принципами «Безопасности России» [3]. Данная концепция, с одной стороны, определяет вектор развития отраслей экономики, включая железнодорожную отрасль, однако, как показывает современный кризисный контекст, демонстрирует свою недостаточную адекватность и устаревание [3, 9]. Анализ текущей ситуации позволяет выделить ряд перспективных направлений для развития железнодорожного транспорта и соответствующих научно-технических задач в области машиноведения в целом:

а) глобальное сокращение природных ресурсов и обострение межгосударственных и межсоюзнических отношений;

б) интенсивное развитие новых знаний, техники и технологий, данные о деградационных механизмах которых отсутствуют либо слабо изучены;

в) появление новых спектров нагруженности вследствие интенсификации эксплуатации (повышение скоростей и т.д.), что требует учёта не только традиционных

штатных, нештатных и проектных режимов, но также запроектных и гипотетических сценариев в течение жизненного цикла техники и технологий;

г) усиление конкурентной борьбы, обуславливающее необходимость сокращения сроков выхода на рынок, а соответственно – времени проектирования, испытаний и подготовки производства, при этом цена ошибки может привести к полному прекращению проекта;

д) противоречие между глобальным разделением труда, в том числе в международной стандартизации (см. например, ISO 22163) и необходимостью сохранения технологического суверенитета государств и их объединений;

е) лавинообразный рост объёма знаний и данных, необходимых при создании техники и технологий, для освоения которых недостаёт как качественных, так и количественных человеческих ресурсов;

ж) обострение военно-политической и военно-экономической обстановки, требующее новых системных решений при разработке машиностроительной продукции;

з) устаревание применяемых в машиностроении и машиноведении методологий – использование детерминированных, допусковых, статистических и вероятностных, а не риск-ориентированных подходов как при разработке технических нормативных документов (технические регламенты, ГОСТы и т.п.), так и в подготовке кадров, методах проектирования, организации производства, эксплуатации и утилизации.

В качестве основного направления для железнодорожного транспорта предлагается углубленное развитие и внедрение риск-ориентированного подхода. Эволюция методологии, начавшаяся после 2000 года, предполагает переход от традиционных детерминированных, допусковых, статистических и вероятностных методов (таких как прогнозирование надёжности) к комплексной системе оценки и управления рисками. Эта парадигма нашла отражение как в фундаментальных научных трудах, так и в прикладных отраслевых разработках – от уникальных проектов до серийного производства в рамках полного жизненного цикла техники.

Особую актуальность и специфику риск-ориентированный подход приобретает именно в железнодорожной отрасли, что обусловлено:

- высокими требованиями к безопасности перевозок;
- сложностью и взаимосвязанностью инфраструктуры и подвижного состава;
- длительными жизненными циклами и необходимостью управления эксплуатационными рисками на всех этапах: от создания новых концептов, проектирования вагонов и локомотивов до их ремонта и утилизации;
- основанными на детерминированной и статистической парадигме нормативами с одной стороны и необходимостью оптимизации затрат на обслуживание с другой.

Для железнодорожного транспорта сформирована и требует дальнейшего внедрения научно обоснованная риск-ориентированная методология. Она должна охватывать все стадии жизненного цикла подвижного состава и систем: от концептуального проектирования и валидации технологий до серийного производства, эксплуатационного контроля, технического обслуживания, ремонтов и завершающей стадии утилизации [3, 9].

Цель работы – разработка концептуальных основ применения риск-ориентированного подхода для технологий обслуживания подвижного состава железнодорожного транспорта, направленных на оптимизацию соотношения «качество – цена – риски» и достижения приемлемого риска (а значит приемлемых вероятностей и интегральных ущербов) вероятности отказов на этапах проектирования на примере узла трения «пятник-подпятник».

Объекты и методы исследований.

В качестве объекта исследований выбран узел трения грузовых вагонов «пятник-подпятник», статистика отказов которого не соответствует требованиям ремонта и замены. Основные причины выхода из строя рассматриваемого узла трения представлены на рис. 1.



а



б



в



г

Рис. 1. Причины выхода из строя узла трения «пятник-подпятник»:

а, б – износ; в, г – изменение геометрических размеров.

Для построения математической модели вероятности отказа в качестве основного параметра, характеризующего отказ узла трения, примем изменение его геометрических размеров во времени, превышающие допустимые регламентами эксплуатации. Пусть функция $U(t)$ описывает линейный износ узла, а $F(t)$ и $V(t)$ являются функциями нагрузки и скорости. Тогда изменения геометрических размеров «пятника-подпятника» от времени описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dU(t)}{dt} = [k_1 + k_2(F(t) \cdot V(t)) + \varepsilon(t)] \quad (1)$$

Интегрируя (1), получим изменение линейного износа $U(t)$, зависящий от начальных параметров $U_0(t)$, нагрузочно-скоростных $F(t)$ и $V(t)$, и суммарного набора случайных событий $\Sigma \varepsilon(t)$:

$$U(t) = U_0(t) + \int_0^t [k_1 + k_2(F(t) \cdot V(t))] dt + \Sigma \varepsilon(t) \quad (2)$$

Вероятность выхода из строя узла $P(t)$ в момент времени t можно представить в виде функции от интенсивности отказов $\lambda(\tau)$:

$$P(t) = F\{U(t) \geq U_{max}\} = 1 - \exp \left[\int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right] \quad (3)$$

$$\lambda(\tau) = \lambda_0 + [U(t)/U_{max}]^Y \quad (4)$$

где $U(t)$ – линейный износ (мм) в момент времени t (с);
 $U_0(t)$ – линейный износ (мм) в начальный момент времени t (с);
 $F(t)$ – динамическая нагрузка на узел (Н);
 $V(t)$ – относительная скорость скольжения (м/с);
 k_1 – коэффициент естественного старения материала;
 k_2 – коэффициент совместного влияния нагрузки и скорости;

$\varepsilon(t)$ – случайная составляющая, отражающая неучтённые факторы;

$\Sigma\varepsilon(t)$ – суммарная накопленная случайная составляющая;

$P(t)$ – вероятность события;

$\lambda(\tau)$ – интенсивность отказов, зависящая от текущего износа в конкретный момент времени τ ; λ_0 – базовая интенсивность отказов нового узла;

γ – степень влияния износа на надёжность.

Предложенная линейная модель может служить первоначальной основой для построения риск-ориентированной модели отказов, если будет удовлетворять условиям эксплуатации. В данной модели коэффициенты совместного влияния и старения материала будут для определенных условий эксплуатации иметь различные значения. В реальных условиях представленная модель при недостаточной достоверности может быть заменена на более сложную структуру.

Применение математических моделей, численных методов, прогнозирования рисков на этапах жизненного цикла техники позволяет сократить время разработки и постановки продукции на производство. При этом следует отметить появление новых рисков - неадекватного физического и математического моделирование, и потребность в определении критериев приемлемости указанных рисков для проведения верификации и валидации конструкторско-технологических рисков, что включает в себя параметр $\Sigma\varepsilon(t)$ как суммарная накопленная случайная составляющая. В связи с чем следует использовать ранжирование вероятности последствий (таблица 1). На рисунке 2 представлена модель, которую предложено использовать для управления рисками путем: введение в конструкторско-технологическую документацию (КТД) в дополнении традиционным- номинальному значению и полю допуска технической характеристики третьей- значимости приоритета, введение новых видов КТД (план управления рисками продукции, процессов, карты потока рисков, анализа рисков и т/д.). Указанное направлено на управление вероятности первопричины-источника отказа (основанных на актуальном развитии науки и техники) в зависимости от интегрального ущерба, а также для сокращения сроков проектирования, подготовки производства - применение математических и численных методов с учетом рисков их применения в дополнении или даже замены физических объектов [1 - 3, 11,12].

Таблица 1

Ранжирование значимости и вероятности событий [10]

Уровень риска	Мероприятия	Примеры событий	Частота/вероятность событий
приемлемый	плановый технический контроль	поломка кондиционера, отклонение от расписания	высокая / 60-70 %
умеренный	мониторинг, дублирующие варианты	отказ бортового оборудования, нарушение графика движения, экстренная ситуация с машинистом	средняя / 40-60%
высокий	пересмотр регламента, разработка особых мер быстрого реагирования	пожар в вагоне, несанкционированные действия на путях, природные явления	низкая / 10-40%
неприемлемый	немедленная остановка, разработка чрезвычайных мер	крупное столкновение, сход с рельсов, жертвы	очень низкая / 1-10%

Учет входных параметров математической модели и ранжирование рисков по значимости позволяет составить цифрой двойник любых значимых элементов конструкции вагонов.

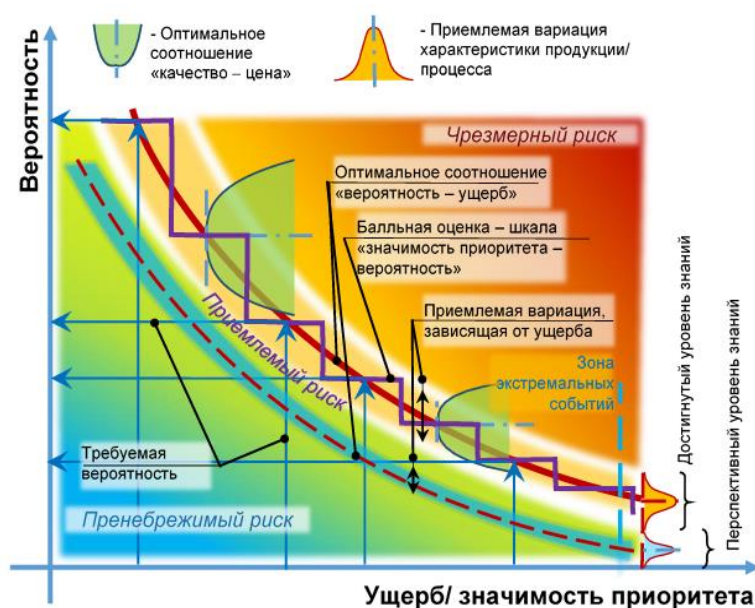


Рис. 2. Бальная оценка значимости приоритета и вероятности отказа [11, 12]

Результаты исследований и их обсуждение.

В таблице 2 приведены примерные параметры составления элемента цифрового двойника узла трения «пятник-подпятник» с учетом ранжирования рисков, а характеристика значимости приоритета (см. рис. 2) указан и прослеживается в жизненном цикле проектирования в цепи поставок в колонке № 7 таблицы 2.

Таблица 2

Общий вид цифрового двойника узла трения «пятник-подпятник»

Наименование узла – «пятник -подпятник»							Проектная организация							Организация-потребитель				
№ элемента	наименование процесса	элемент контроля	Характеристики			приоритетность в характеристиках	персонал: квалификация/мотивация	получение данных	Методы оценки					Методы контроля				
			номер	параметр	процесс				технический регламент	способ оценки	метод учета вероятности отказа	метод учета риска	значимость риска	аудит процесса	маркировка отказов	форма документирования	план реагирования	анализ данных/архивирование
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
XX	Прогнозирование линейного износа. Условия штатные, нестандартные, проектные, запроектные	Модели физические, математические, ПО для расчета остаточного ресурса. База данных в реальном времени.	X	Ресурс прогнозируемый	Линейный износ	8	Уровень компетенции	Анализ данных в реальном времени	Согласно ТУ	Метод, регламент	Метод, регламент	Согласно методике XX	При проектировании	График приемки	Ярлык, нумерация	Протокол расчетов.	Рабочая инструкция XX	Рабочая инструкция УУ
XX	Оценка линейного износа. Условия штатные, нестандартные, проектные, запроектные	Испытательное оборудование согласно ТУ и ГОСТ	X	Ресурс остаточный	Линейный износ	8	уровень компетенции	Анализ данных накопленной базы экспериментов	Согласно ТУ	Метод, регламент	Метод, регламент	Согласно методике XX	При верификации образца из партии	График приемки	Ярлык, нумерация	Протокол испытаний	Рабочая инструкция XX	Рабочая инструкция УУ

Выводы.

Разработаны концептуальные основы применения риск-ориентированного подхода для технологий обслуживания подвижного состава железнодорожного транспорта, направленных на оптимизацию соотношения «качество – цена – риски» и достижения приемлемого риска (а значит приемлемых вероятностей и интегральных ущербов). Переход, например, от планово-предупредительной системы обслуживания подвижного состава к риск-ориентированной модели позволит сокращать время на лабораторные испытания и прогнозировать остаточный ресурс узлов трения на основе текущих данных телеметрии, оптимизировать графики ТО и ремонтов, оценивать влияние эксплуатационных режимов (скорость, нагрузка) на долговечность узлов трения, формировать риск-ориентированную стратегию замены узлов трения, минимизирующую риски отказов в пути.

Разработка и с учетом рисков применение математических моделей прогнозирования и цифровых двойников элементов подвижного состава позволит оптимизировать соотношение «качество – цена – риски», что будет способствовать повышению конкурентоспособности продукции во всей машиностроительной отрасли при сокращении сроков и затрат, как при создании новых производств, так и в цепи поставок технологического суверенитета.

Список литературы

1. **Горбачевич, М. И.** Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: Монография / М. И. Горбачевич, А. Н. Панов, С. М. Минюкович; Под общ.ред. А. Н. Панова. - Мн. Технопринт. - 2005. - 264 с.
2. **Панов, А. Н.** Научно-методические основы проектирования: системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография А.Н. Панов, И.И. Осмола, И.В. Шкадретсов, В.Б. Ловкис, Л.А. Маринич; под общ.ред. А.Н. Панов. – Минск: БГЦ. - 2009. - 482 с.
3. **Махутов, Н. А.** и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность / Под общ. ред. Н.А. Махутова. Москва: Знание. - 2018. - 1016 с.
4. **Крагельский И. В., Михин Н. М.** Узлы трения машин: Справочник. - М.: Машиностроение. -1984. - 280 с.
5. **Ковалёва И. Н.** Перспективы развития биоразлагаемых смазочных материалов на основе растительных и животных жиров для железнодорожного транспорта/ Ковалёва И. Н., Сычев А. П., Шубитидзе В. В., Пигунов А. В., Подгорная В. В. // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 71 – 75.

References

1. **Gorbatsevich, M. I.** Design of vehicles: load, damage, resource: Monograph / M. I. Gorbatsevich, A. N. Panov, S. M. Minyukovich; Under general editorship A. N. Panova. - Mn. Technoprint. - 2005. - 264 p.
2. **Panov, A. N.** Scientific and methodological foundations of design: systemic provision of acceptable risks in automotive and agricultural machinery manufacturing: monograph by A. N. Panov, I. I. Osmola, I. V. Shkadretsov, V. B. Lovkis, L. A. Marinich; edited by A. N. Panov. – Minsk: BGC. - 2009. - 482 p.
3. **Makhutov, N. A., et al.** Russia's Security. Legal, Socio-Economic, Scientific and Technical Aspects. Man-Made, Technological and Technospheric Safety / Ed. by N. A. Makhutov. Moscow: Knowledge. - 2018. - 1016 p.
4. **Kragel'skiy I. V., Mikhin N. M.** Machine friction units: Handbook. - M.: Mechanical Engineering. - 1984. - 280 p.
5. **Kovaleva I. N.** Prospects for the development of biodegradable lubricants based on vegetable and animal fats for railway transport / Kovaleva I. N., Sychev A. P., Shubitidze V. V., Pigunov A. V., Podgornaya V. V. // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2024. - No. 4. - P. 71 - 75.

6. **Хазиахметова Г. А., Мубаракшина Д. Н., Ахмадеева Л. Р.** Использование технологий искусственного интеллекта для оптимизации процессов управления в производственных системах // Журнал Современные наукоемкие технологии. – 2025. – №. 2. – С. 82-87.
7. **Зорин, В. А.** Надежность механических систем: Учебник. - М.: ИНФРА-М. – 2015. - 380 с.
8. **В. В. Алексеев, С. И. Гавриленко, А. Н. Панов, В. Е. Столяров** Математические модели и методики обеспечения приемлемых исков информационно-измерительных и управляющих систем транзитных газопроводов. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2016. - 160 с.
9. **Marchenko L. N., Kavaliova I. N., and Podgornaya V. V.** Selection of a Base Vegetable Oil for the Development of a Biodegradable Lubricant Using the TOPSIS Method // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2024, Vol. 53, No. 4, pp. 313–320. DOI: 10.1134/S1052618824700195.
10. Распоряжение №546/р от 13.03.2020 «Об утверждении Методики оценки рисков, связанных с функционированием моторвагонного подвижного состава».
11. **Панов, А. Н.** Анализ рисков несоответствий продукции машиностроения и технологических процессов их изготовления при проектировании/ А.Н. Панов, Ж.А. Мрочек, В.М. Пашкевич // Вестн. Белорус. Рос. ун-та.- 2021.- №4. С. 46-58.
12. **Панов А. Н., Ромашова Е. Ю.** Основы методологии риск-ориентированного проектирования в машиностроении/ Машиностроение и инженерное образование. М. – 2024. - №1-2, С. 8-16.

6. **Khaziakhmetova G. A., Mubarakshina D. N., Akhmadeeva L. R.** Using artificial intelligence technologies to optimize control processes in production systems // Journal of Modern Science-Intensive Technologies. - 2025. - No. 2. - P. 82-87.
7. **Zorin, V. A.** Reliability of mechanical systems: Textbook. - M.: INFRA-M. - 2015. - 380 p.
8. **V. V. Alekseev, S. I. Gavrilenko, A. N. Panov, V. E. Stolyarov** Mathematical models and methods for ensuring acceptable claims of information, measuring and control systems of transit gas pipelines. St. Petersburg: ETU "LETI". - 2016. - 160 p.
9. **Marchenko L. N., Kavaliova I. N., and Podgornaya V. V.** Selection of a Base Vegetable Oil for the Development of a Biodegradable Lubricant Using the TOPSIS Method // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2024, Vol. 53, No. 4, pp. 313–320. DOI: 10.1134/S1052618824700195.
10. Order No. 546/r of March 13, 2020 "On approval of the Methodology for assessing risks associated with the operation of multiple-unit rolling stock."
11. **Panov, A. N.** Analysis of the risks of non-conformities in mechanical engineering products and technological processes of their manufacture during design / A. N. Panov, Zh. A. Mrochek, V. M. Pashkevich // Vestn. Belarus. Ros. University. - 2021. - No. 4. P. 46-58.
12. **Panov A. N., Romashova E. Yu.** Fundamentals of the methodology of risk-oriented design in mechanical engineering / Mechanical engineering and engineering education. Moscow - 2024. - No. 1-2, pp. 8-16.

*I. N. Kavaliova, A. V. Pygunov, A. N. Panov, E. Yu. Romashova,
A. P. Sychev, V. V. Shubitidze, Yu. S. Podgornaya*

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF LOCOMOTIVE, TRAIN AND VEHICLE MAINTENANCE TECHNOLOGY. RISK-BASED APPROACH

Abstract. The transition from deterministic, tolerance, statistical and probabilistic paradigms to a risk-oriented concept in rail transport is considered. The presented approach aims at optimizing the "quality - cost - risk" ratio, which contributes to increasing competitiveness in the entire machine-building industry. An analysis of current problems has been carried out, the possible ways of development of methodology as well as models and methods of justification of design-technological

risks in the field of railway engineering and system in general are considered. Examples of risk-oriented strategy to replace the main friction nodes are presented, using the example of a center bowl and pivot, which minimizes the risks of failures along the way.

Keywords: risk-based approach, railway transport, friction unit, center bowl and pivot.

For citation: Kavaliova, I. N. Prospects for the Development of Locomotive, Train and Vehicle Maintenance Technology. Risk-Based Approach / I. N. Kavaliova, A. V. Pygunov, A. N. Panov, et all // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 102–110. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_102.

Сведения об авторах

Ковалева Инна Николаевна

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси» (ИММС НАН Беларуси),
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: innakov2@mail.ru

Пигунов Анатолий Владимирович

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ),
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: tvp29@yandex.ru

Панов Александр Николаевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук»,
кандидат технических наук,
e-mail: a.panov@tut.by

Ромашова Екатерина Юрьевна

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук»,
младший научный сотрудник,
e-mail: romashova@imash.ru

Сычев Александр Павлович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук" (ЮНЦ РАН),
кандидат физико-математических наук, доцент,
e-mail: alekc_sap@mail.ru

Information about the authors

Kavaliova Inna Nikolaevna

The State Scientific Institution «V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus» (MPRI NASB),
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: innakov2@mail.ru

Pigunov Anatolii Vladimirovich

Belarusian State University of Transport (BelSut),
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: tvp29@yandex.ru

Panov Alexander Nikolayevich

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Candidate of Technical Sciences,
e-mail: a.panov@tut.by

Romashova Ekaterina Yuryevna

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Junior Researcher,
e-mail: romashova@imash.ru

Sychev Aleksandr Pavlovich

Federal State Budgetary Institution of Science «Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences» (SSC RAS),
Candidate of Physical-Mathematics Sciences, Associate Professor,
e-mail: alekc_sap@mail.ru

Шубитидзе Виктория Викторовна

Ростовский государственный
университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kvi@rgups.ru

Shubitidze Victoria Victorovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Mechanics»,
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor,
e-mail: kvi@rgups.ru

Подгорная Юлия Сергеевна

Государственное учреждение образования
«Университет Национальной академии наук
Беларуси»,
магистрант,
e-mail: julipodgornayafff@mail.ru

Podgornaya Yuliya Sergeevna

The State Educational Institution «University
of National Academy of Sciences of
Belarus»,
Master's Degree Student,
e-mail: julipodgornayafff@mail.ru

С. Н. Коржов, П. А. Поляков

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОРМОЖЕНИЯ ПУТЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ КЛЕЩЕВОГО МЕХАНИЗМА ТОРМОЗНОГО УСТРОЙСТВА

Аннотация. Проанализировано взаимодействие рабочих пар тормозного устройства с клещевым механизмом при движении тележки электропоезда на повороте. Возникающий крен колесной пары приводит к образованию локальных контактирующих зон колодки с поверхностями тормозного диска. В результате чего происходит неравномерное взаимодействие в рамках не только одной колесной пары, но и неравномерность в рамках одного тормозного блока. Для устранения данного недостатка была предложена усовершенствованная конструкция клещевого механизма, допускающая поворот колодки в трех плоскостях, что позволяет увеличить площадь контакта рабочих пар. Для корректировки взаимодействующих колодок с поверхностью диска использовался актуатор. Было проведено компьютерное моделирование процесса торможения силовыми устройствами с серийным и усовершенствованным клещевыми механизмами. Применение тормоза с усовершенствованным клещевым механизмом позволило снизить время торможения в 1,28 раза по сравнению с серийным тормозом. Нормальные силы в контакте были снижены в 57,5 раза, что показало увеличение эффективности торможения при прохождении криволинейных участков пути.

Ключевые слова: тормозное устройство, клещевой механизм, крен колесной пары, актуатор, колодка, тормозной диск.

Для цитирования: Коржов, С. Н. Повышение эффективности торможения путем усовершенствования конструкции клещевого механизма тормозного устройства / С. Н. Коржов, П. А. Поляков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 111–119. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_111.

Тормозные устройства, оснащенные клещевым механизмом, применяемые на современных электропоездах, должны обеспечивать требуемую эффективность на всех участках пути следования электропоезда, включая криволинейные участки [1-5]. В отличие от автомобильного транспорта клещевой механизм, обеспечивающий прижатие колодки к тормозному диску, закреплен на тележке, что приводит относительным линейным и угловым смещениям колодок относительно поверхности диска при прохождении криволинейных участков пути. В статьях [6, 7] приводится моделирование процесса схода с рельсов состава при движении на повороте. В исследованиях [8, 9] получена корреляция между тормозными характеристиками и износом обода колеса. В статьях [10, 11] проведено исследование распределения линейного износа в паре «колесо – рельс» между колесами тележки при движении по криволинейному участку пути. В диссертации [12] представлена разработка рациональной конструкции тормозного устройства с наличием параллелограммных контуров и перемещений осей рычагов относительно тормозного диска.

Аналитически рассчитать линейные и угловые перемещения тормозных блоков относительно тормозного диска возможно только при помощи определения линейных и угловых перемещений тележки, учитывая многомассовую колебательную систему (половина вагона – тележка – колесные пары) (рис. 1). Аналитически решение этой задачи является чрезвычайно сложным, потому как необходимо учитывать большое количество упругих и диссипативных связей и внешних источников возмущения.

После аналитического метода определения перемещений тележки электропоезда, необходимо определить силовые факторы в паре «тормозной диск – тормозная колодка».

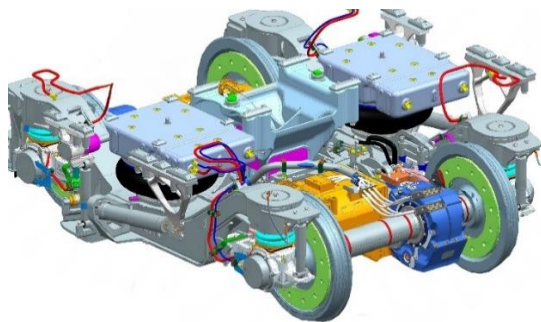


Рис. 1. Многомассовая система «половина вагона– тележка – колесные пары

При этом нормальные и тангенциальные силы для каждого тормозного блока на каждой колесной паре передней и задней тележек электропоезда будут различными по величине (рис. 2).

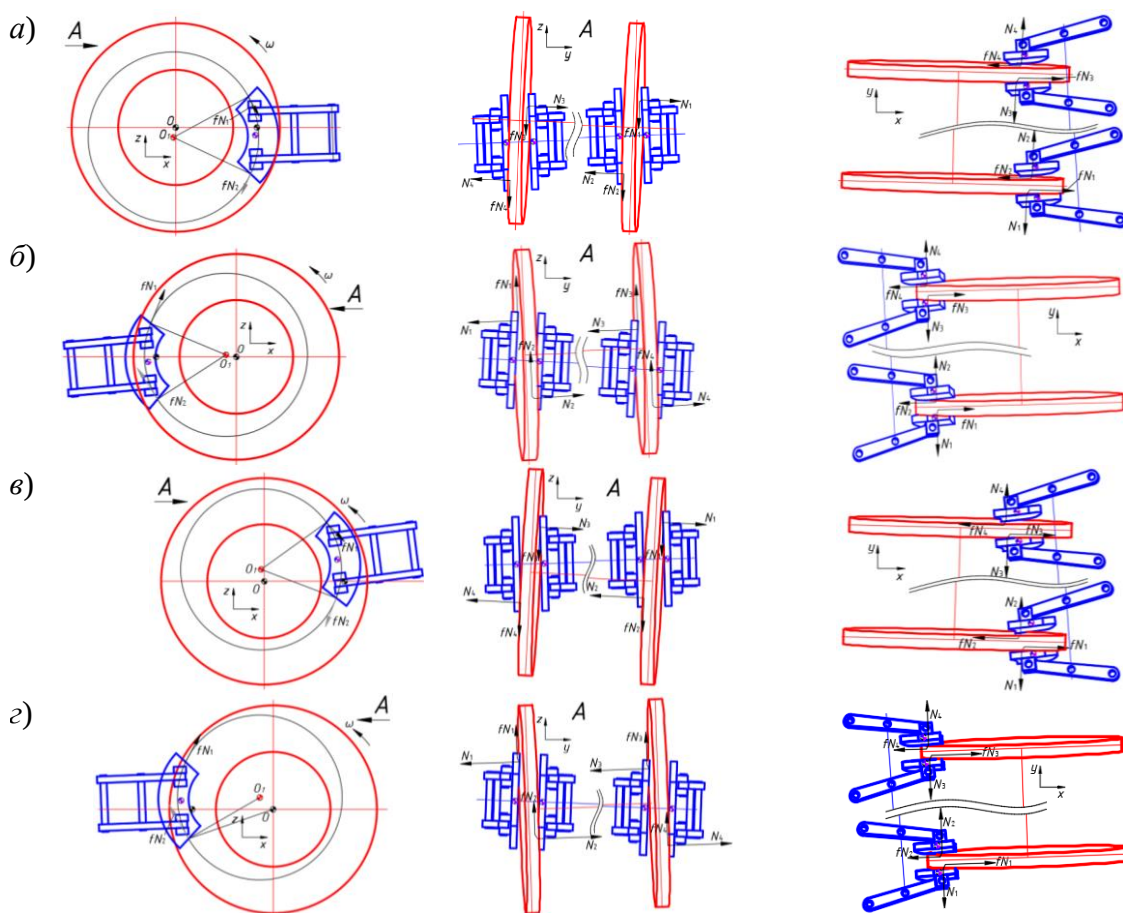


Рис. 2. Изменение нормальных и тангенциальных сил в паре «тормозной диск –тормозная колодка» в зависимости от расположения колесных пар тележек электропоезда: а – передняя колесная пара передней тележки; б – задняя колесная пара передней тележки; в – передняя колесная пара задней тележки; г – задняя колесная пара задней тележки

Если рассматривать тормозные колодки и поверхности тормозного диска как абсолютно твердые тела, то при движении электропоезда по криволинейному участку колодки контактируют с дисками по линии или точками, расположенными на краях колодок. Это

приводит к значительным динамическим нагрузкам, сосредоточенным локально на поверхностях пары трения, что ведет к значительному и неравномерному износу. Для выравнивания нагрузок по площади колодок необходимо усовершенствовать конструкцию тормозного блока с клещевым механизмом.

Усовершенствование конструкции тормозного устройства (рис. 3) заключается в замене вращательных шарниров, установленных между колодкой и рычагом тормозного блока на сферический шарнир, обеспечивающих наклон оси колодки в различных плоскостях. Для стабилизации положения колодки используются тяги актуатора, связывающие оси колодки и привода клещевого механизма.

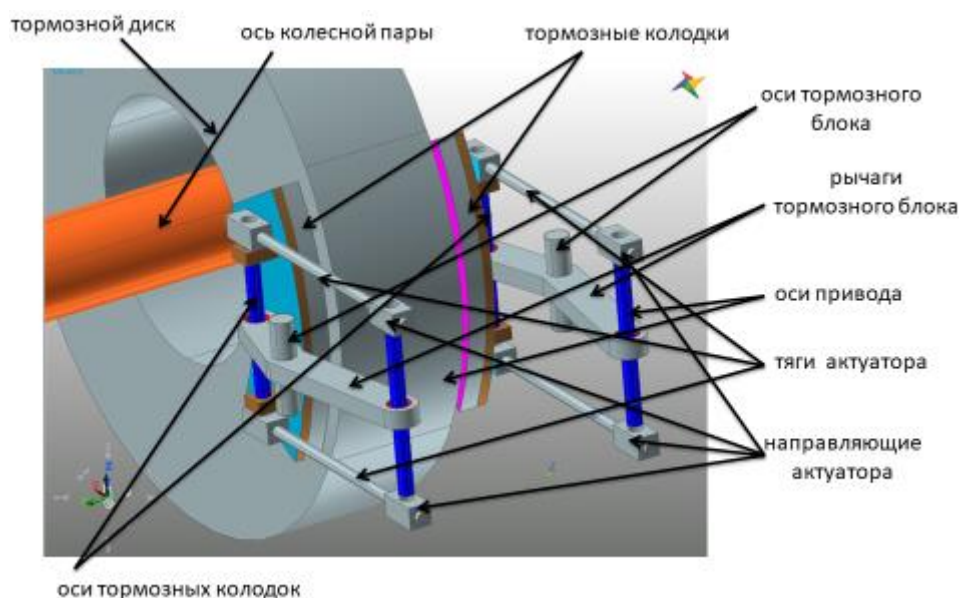


Рис. 3. Усовершенствованная конструкция тормозного блока с клещевым механизмом

Для сравнения замедления и изменения нормальных сил в паре «тормозная колодка – тормозной диск» были созданы твердотельные модели тормозных устройств со серийным и усовершенствованным клещевыми механизмами. Аналитически определить нормальные силы в парах трения тормоза с учетом перемещения диска является достаточно трудоемким процессом, поэтому исследование твердотельного взаимодействия рассматриваемых конструкций. Для имитации качения колесной пары по прямолинейному участку пути имитировалось колебание на 0,5 градуса в течении от 0 до 2,5с, после колесная пара въезжала на криволинейный участок с углом крена на 4 градуса с продолжающимися вертикальными колебаниями при движении по участку от 2,5 до 13с, после колесная пара катилась снова по прямолинейному участку с колебанием на величину 0,5 градуса на протяжении 5с.

В результате движения рабочие поверхности тормозного диска с серийным клещевым механизмом отклонялись от оси Oz и прижатие колодок осуществлялось краями. Тогда как тормозное устройство с усовершенствованным механизмом обеспечивало увеличение площади колодки после прижатия. Для сравнительного анализа процесса взаимодействия рабочих пар тормозных устройств сведем все данные в таблицу 1. При взаимодействии рабочих пар тормозного блока с усовершенствованным клещевым механизмом при постоянном изменении положения тормозного диска относительно колодок тормоза, небольшие участки колодок не задействованы в процессе торможения, что может привести к локальному износу фрикционных накладок. Для ликвидации незадействованных участков накладок при торможении необходимо корректировать положение колодки с помощью актуаторов в продольной плоскости тормозного диска, перемещая тяги актуаторов через направляющие, связывающие шарнирно оси привода и оси колодки. Результаты моделирования взаимодействия левой и правой колодок с поверхностью диска для сравнительного анализа сведем аналогично в таблицы 2 и 3.

Таблица 1

Положение колодок относительно тормозного диска

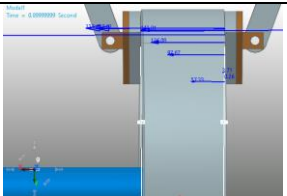
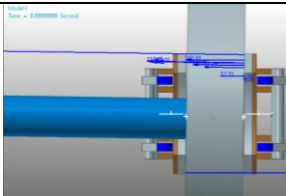
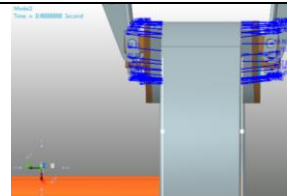
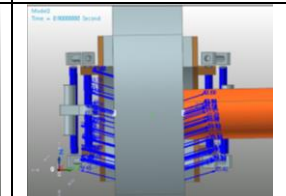
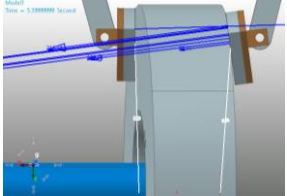
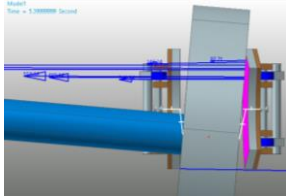
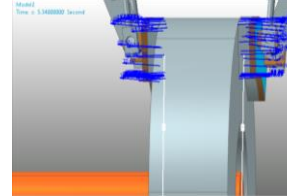
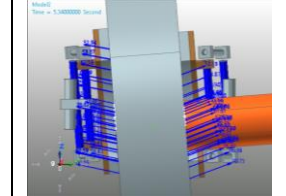
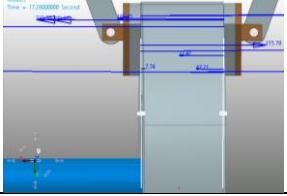
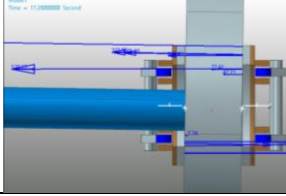
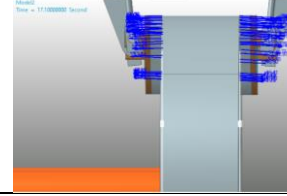
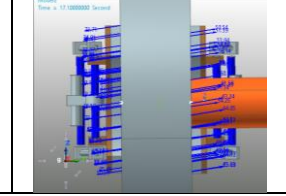
Крен, град.	Тормоз с серийным клещевым механизмом		Тормоз с усовершенствованным клещевым механизмом	
	Вид сверху	Вид спереди	Вид сверху	Вид спереди
от 0 до 0,5				
от 4 до 4,5				
от 0 до 0,5				

Таблица 2

Положение левой колодки относительно тормозного диска при его наклоне

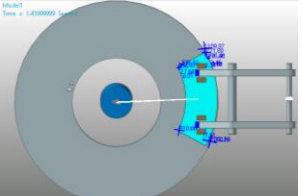
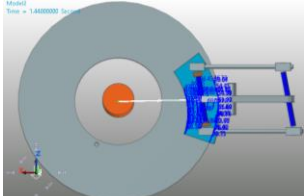
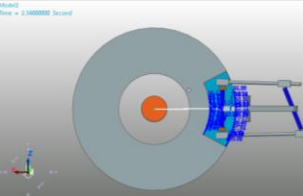
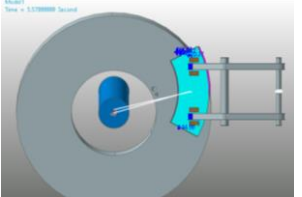
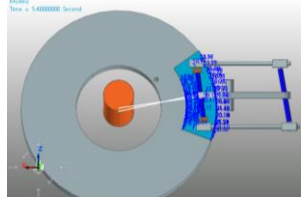
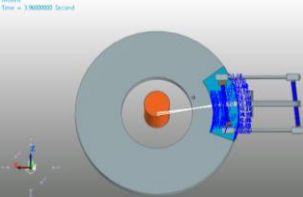
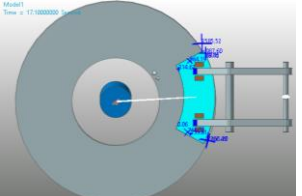
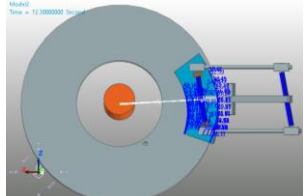
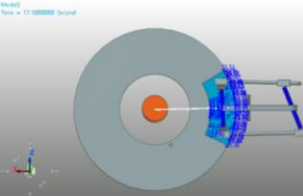
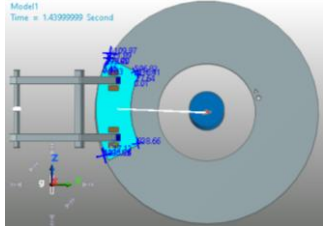
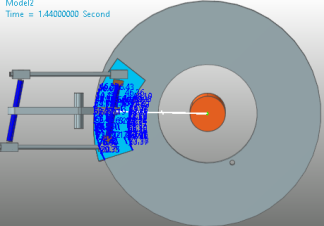
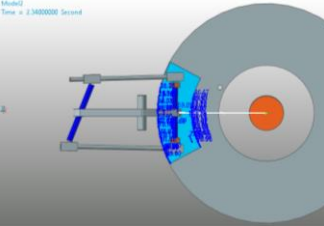
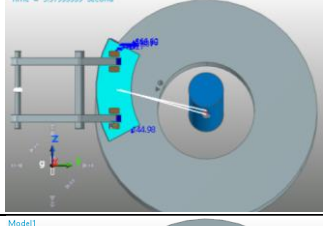
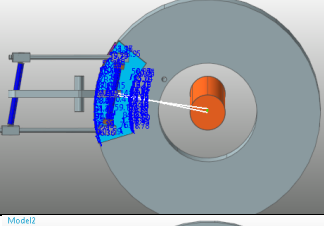
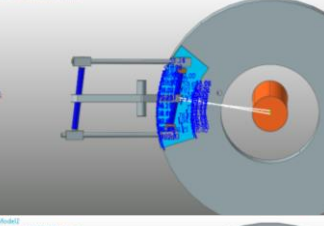
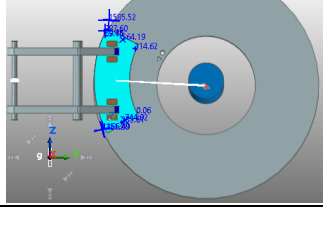
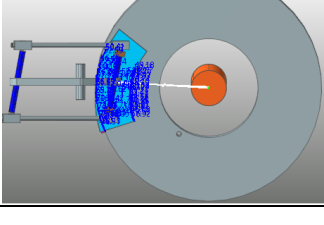
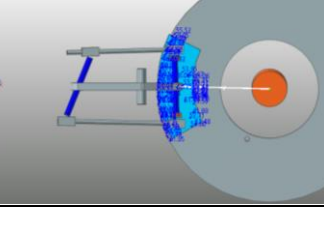
Крен, град.	Тормоз с серийным клещевым механизмом	Тормоз с серийным усовершенствованным механизмом без актуатора	Тормоз с серийным усовершенствованным механизмом с актуатором
от 0 до 0,5			
от 4 до 4,5			
от 0 до 0,5			

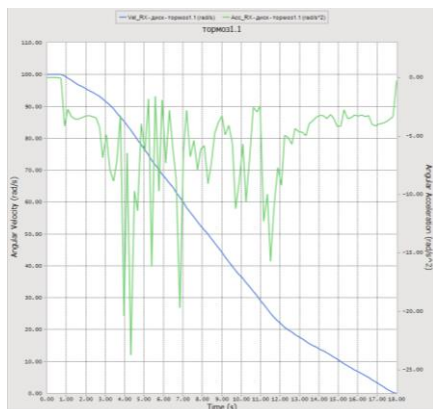
Таблица 3

Положение правой колодки относительно тормозного диска при его наклоне

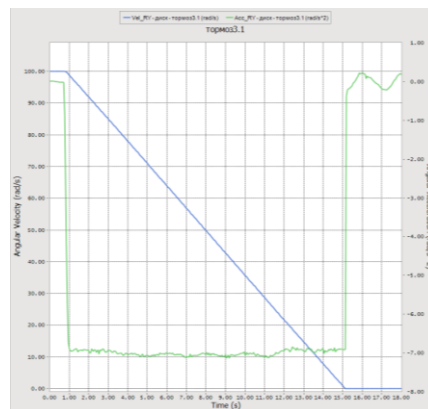
Крен, град.	Тормоз с серийным клещевым механизмом	Тормоз с серийным усовершенствованным механизмом без актуатора	Тормоз с серийным усовершенствованным механизмом с актуатором
от 0 до 0,5			
от 4 до 4,5			
от 0 до 0,5			

На основании результатов моделирования были построены кривые угловой скорости и углового замедления тормозного диска за время торможения (рис. 4).

а)



б)



в)

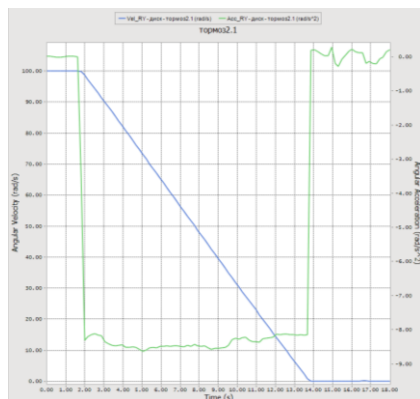
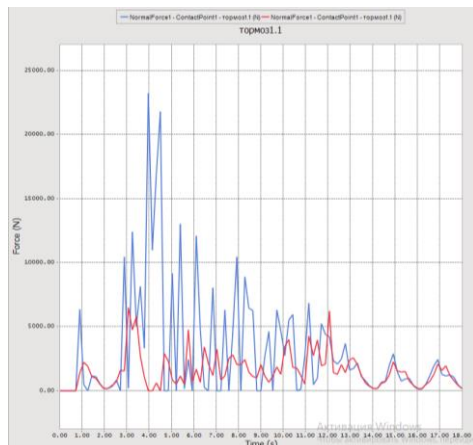


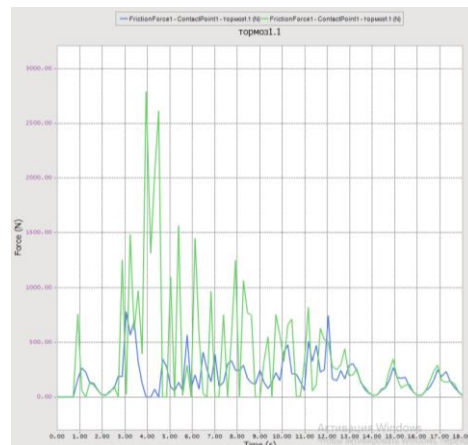
Рис. 4. Изменение угловой скорости вращения и углового замедления тормозного диска за время взаимодействия рабочих пар тормозных устройств: а – с серийным клещевым механизмом; б – с усовершенствованным клещевым механизмом без активного актуатора; в – с усовершенствованным клещевым механизмом с включенным актуатором

Помимо макропараметров тормозного процесса необходимо исследовать критерии взаимодействия рабочих пар тормозных устройств (рис. 5).

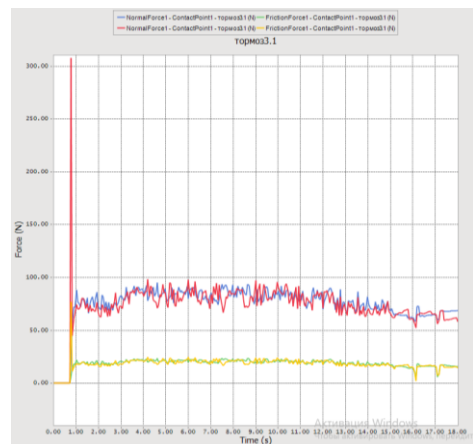
а)



б)



в)



г)

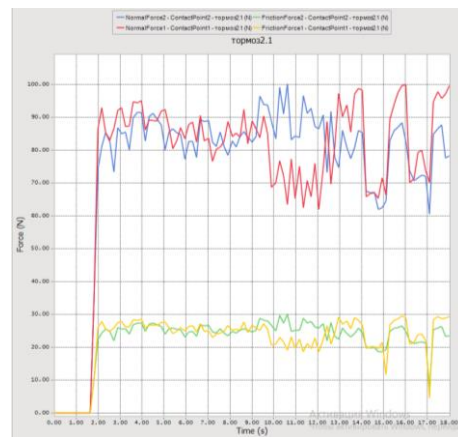


Рис. 5. Изменение нормальных и тангенциальных сил в паре «тормозная колодка – тормозной диск» за время торможения: а – с серийным клещевым механизмом для левой колодки; б – с серийным клещевым механизмом для правой колодки; в – с усовершенствованным клещевым механизмом без активного актуатора для обеих колодок; г – с усовершенствованным клещевым механизмом с включенным актуатором для обеих колодок

Полученные результаты моделирования позволяют утверждать, что применение актуатора позволяют распределить прижимающие силы, действующие со стороны клещевого механизма тормоза по всей площади колодок. Время торможения при использовании тормозного устройства с усовершенствованным клещевым механизмом снизилось в 1,28 раз, по сравнению с серийным клещевым механизмом. Нормальные и тангенциальные силы выровнялись по всей площади рабочих пар тормозного устройства с усовершенствованным клещевым механизмом, при этом применение актуатора позволило снизить величины силовых факторов в 57,5 раз, в сравнении с серийным тормозом.

Список литературы

1. Яицков, И. А. Моделирование динамики рычажной передачи тормозной системы в процессе торможения на участке пути, имеющему неровности (на примере пассажирского вагона) / И. А. Яицков, В. В. Косаревский // Вестник Донского

References

1. Yaitskov, I. A. Modeling the dynamics of the lever transmission of the brake system during braking on a section of the track with unevenness (using a passenger car as an example) / I. A. Yaitskov, V. V. Kosarevsky // Bulletin of the Don State Technical University.

государственного технического университета. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 36-41. – DOI 10.23947/1992-5980-2020-20-1-36-41. – EDN XZXASI.

2. **Яицков, И. А.** Эффективность теплоотвода поверхностей тормозного диска тормозной системы подвижного состава при различных режимах работы вентиляционного аппарата / И. А. Яицков, Е. С. Федотов, А. А. Назаретов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1(97). – С. 219-224. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_219. – EDN BKEGWH.

3. **Яицков, И. А.** Методика определения аэродинамических характеристик диффузорных вентиляционных каналов тормозных дисков транспортных средств / И. А. Яицков, Е. С. Федотов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1(89). – С. 257-263. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_257. – EDN RCETKE.

4. Влияние направление воздушного потока воздуха на эффективность работы вентиляционного аппарата тормозного диска / И. А. Яицков, Е. С. Федотов, М. В. Стародуб [и др.] // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 15. – С. 99-103. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-15-99-103. – EDN BJEISP.

5. **Яицков, И. А.** Повышение эффективности торможения локомотивов: специальность 05.22.07 "Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Яицков Иван Анатольевич. – Ростов-на-Дону, 2003. – 233 с. – EDN NMKGOJ.

6. **Sun, Y.Q.** Mitigating train derailments due to sharp curve and overspeed (2018) *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2018. – vol. 4. – 12p. DOI: 10.3389/fmech.2018.00008.

7. **Paetsch C.R., Perlman A.B., Jeong D.Y.** Dynamic simulation of train derailments (2006) *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Chicago, USA)* 10p. DOI:10.1115/IMECE2006-14607.

- 2020. – Vol. 20, No. 1. – P. 36-41. – DOI 10.23947/1992-5980-2020-20-1-36-41. – EDN XZXASI.

2. **Yaitskov, I. A.** Efficiency of heat removal of brake disc surfaces of the rolling stock braking system under various operating modes of the ventilation apparatus / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov, A. A. Nazaretov // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*. – 2025. – No. 1 (97). – P. 219-224. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_219. – EDN BKEGWH.

3. **Yaitskov, I. A.** Methodology for determining the aerodynamic characteristics of diffuser ventilation ducts of brake discs of vehicles / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*. – 2023. – No. 1 (89). – P. 257-263. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_257. – EDN RCETKE.

4. The influence of air flow direction on the efficiency of the brake disc ventilation apparatus / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov, M. V. Starodub [et al.] // *Transport, mining and construction engineering: science and production*. – 2022. – No. 15. – P. 99-103. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-15-99-103. – EDN BJEISP.

5. **Yaitskov, I. A.** Increasing the efficiency of locomotive braking: specialty 05.22.07 "Rolling stock of railways, train traction and electrification": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Yaitskov Ivan Anatolyevich. – Rostov-on-Don, 2003. – 233 p. – EDN NMKGOJ.

6. **Sun, Y.Q.** Mitigating train derailments due to sharp curve and overspeed (2018) *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2018. – vol. 4. – 12p. DOI: 10.3389/fmech.2018.00008.

7. **Paetsch C.R., Perlman A.B., Jeong D.Y.** Dynamic simulation of train derailments (2006) *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Chicago, USA)* 10p. DOI:10.1115/IMECE2006-14607.

8. Rui S., Chenxu L., Lixia S., Zhongkai Z., Dilai C., Gang S. Analysis of wheel wear and wheel-rail dynamic characteristics of high-speed trains under braking conditions (2024) Shock and Vibration, 16p. <https://doi.org/10.1155/2024/9618500>.
9. Hamdaoui A., Jaddi El H. Effects of the brake shoe friction material on the railway wheel damage (2018) MATEC Web of Conferences, 149 4p. DOI:10.1051/mateconf/201714901090.
10. Xuesong J., Xinbiao X., Zefeng W., Jun G., Minhao Z. An investigation into the effect of train curving on wear and contact stresses of wheel and rail (2009) Tribology International, 42, pp. 475-490, DOI:10.1016/j.triboint.2008.08.004.
11. Воробев, А. А. Контактное взаимодействие колеса и рельса (2009) Вестник ИрГТУ №3(39) С. 42-47.
12. Разработка рациональной конструкции блока дискового тормоза для скоростных грузовых и высокоскоростных пассажирских вагонов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.22.07 / Мошков Алексей Александрович. - Москва, 2014. - 217 с.

8. Rui S., Chenxu L., Lixia S., Zhongkai Z., Dilai C., Gang S. Analysis of wheel wear and wheel-rail dynamic characteristics of high-speed trains under braking conditions (2024) Shock and Vibration, 16p. <https://doi.org/10.1155/2024/9618500>.
9. Hamdaoui A., Jaddi El H. Effects of the brake shoe friction material on the railway wheel damage (2018) MATEC Web of Conferences, 149 4p. DOI:10.1051/mateconf/201714901090.
10. Xuesong J., Xinbiao X., Zefeng W., Jun G., Minhao Z. An investigation into the effect of train curving on wear and contact stresses of wheel and rail (2009) Tribology International, 42, pp. 475-490, DOI:10.1016/j.triboint.2008.08.004.
11. Vorobev, A. A. Contact interaction of wheel and rail (2009) IrSTU Bulletin No. 3 (39) P. 42-47.
12. Development of a rational design of a disc brake block for high-speed freight and high-speed passenger cars: dissertation ... candidate of technical sciences: 05.22.07 / Moshkov Aleksey Aleksandrovich. - Moscow, 2014. - 217 p.

S. N. Korzhov, P. A. Polyakov

IMPROVING BRAKING PERFORMANCE BY UPGRADING THE DESIGN OF THE CLAMPING MECHANISM OF THE BRAKING DEVICE

Abstract. The interaction of the working pairs of the braking device with the clamping mechanism during the movement of the electric train trolley on a turn is analyzed. The resulting roll of the wheelset leads to the formation of local contact areas of the pad with the surfaces of the brake disc. As a result, there is uneven interaction within not only one wheelset, but also unevenness within one brake unit. To eliminate this drawback, an improved design of the clamping mechanism has been proposed, allowing the pads to rotate in three planes, which increases the contact area of the working pairs. An actuator was used to adjust the interacting pads with the disc surface. Computer simulation of the braking process by power devices with serial and improved clamping mechanisms was carried out. The use of a brake with an improved clamping mechanism has reduced braking time by 1.28 times compared to the standard brake. The normal forces in contact were reduced by 57.5 times, which showed an increase in braking efficiency when passing curved sections of the track.

Keywords: brake device, clamping mechanism, wheelset roll, actuator, pad, brake disc.

For citation: Korzhov, S. N. Improving Braking Efficiency by Upgrading the Design of the Clamping Mechanism of the Braking Device / S. N. Korzhov,

P. A. Polyakov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya.
– 2025. – № 4. – P. 111–119. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_111.

Сведения об авторах**Коржов Сергей Николаевич**

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»,
аспирант,
e-mail: ksn@engcenter.ru

Поляков Павел Александрович

Набережночелнинский институт Казанского
федерального университета,
кафедра «Механики и конструирования»,
заведующий кафедрой,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Information about the authors**Korzhov Sergey Nikolaevich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life Safety»,
Postgraduate Student,
e-mail: ksn@engcenter.ru

Polyakov Pavel Alexandrovich

Naberezhnye Chelny Institute of Kazan
Federal University,
Chair «Mechanics and Engineering»,
Head of the Chair,
Doctor of Technical Sciences, Associate
Professor,
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

С. Ф. Маклаков, В. А. Мишин

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ПОСАДКЕ С НАТЯГОМ С ПОМОЩЬЮ ANSYS

Аннотация. В статье показана методика решения контактной задачи определения напряжений и деформаций элементов конструкции, соединенных посадкой с натягом, с использованием конечноэлементного программного комплекса ANSYS. Контактирующие элементы геометрически представляют собой толстостенные полые цилиндры, причем наружный диаметр внутреннего цилиндра (вала) больше внутреннего диаметра внешнего цилиндра (втулки). Исследуемый диапазон величины изначального проникновения (натяга) составлял 0,1 мм – 1 мм. Определялись нормальные напряжения на поверхности контакта, эквивалентные напряжения по Мизесу в контактирующих элементах и суммарные деформации в них.

Ключевые слова: контактная задача деформируемых поверхностей, контактные конечные элементы, эквивалентные напряжения, энергетическая теория прочности, равновесное состояние при начальном внедрении.

Для цитирования: Маклаков, С. Ф. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкции при посадке с натягом с помощью ANSYS / С. Ф. Маклаков, В. А. Мишин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 120–128. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_120.

Соединение элементов конструкции посадкой с натягом представляет рациональный способ соединения для передачи внешнего скручивающего момента. В этом случае отсутствуют соединительные элементы, которые ослабляют поперечные сечения элементов и снижают допустимую величину передаваемой нагрузки. Однако это справедливо только в том случае, если величина эквивалентных напряжений, возникающих при соединении деталей (начальном проникновении), не превышает допустимого значения с учетом последующего внешнего нагружения [1, 2]. Величина этих напряжений при известных геометрических характеристиках соединяемых конструктивных элементов и упругих характеристиках используемых конструкционных материалов определяется только величиной натяга, то есть разностью между наружным диаметром внутреннего цилиндра (вала) и внутренним диаметром полого наружного цилиндра (отверстия втулки).

Рассмотренные элементы конструкции, соединенные посадкой с натягом, имеют форму толстостенных полых цилиндров (рис. 1), причем наружный диаметр внутреннего цилиндра (вала) больше внутреннего диаметра внешнего цилиндра (втулки). При анализе напряжений и деформаций в силу симметрии моделируется четверть конструкции – один сектор 90°.

Определение равновесного состояния при посадке с натягом реализуется в ANSYS в два этапа. На первом этапе решения задаются только граничные условия - ограничения на степени свободы (условия закрепления) и условия симметрии (при их наличии), внешние нагрузки отсутствуют. На втором этапе происходит реализация алгоритма начального внедрения.

Реализация решения задачи включает несколько этапов, некоторые из них не содержат принципиальных отличий от других задач.

1 Выбор типа конечного элемента, используемого в расчете.

2 Выбор свойств механических характеристик материала элементов конструкции.

- 3 Построение геометрических моделей вала и втулки.
- 4 Конечно-элементное разбиение геометрической модели.
- 5 Создание контактных пар с использованием Contact Wizard.
- 6 Приложение граничных условий и условий симметрии.
- 7 Задание параметров решения и его реализация.
- 8 Просмотр полученных результатов расчета (постпроцессинг).

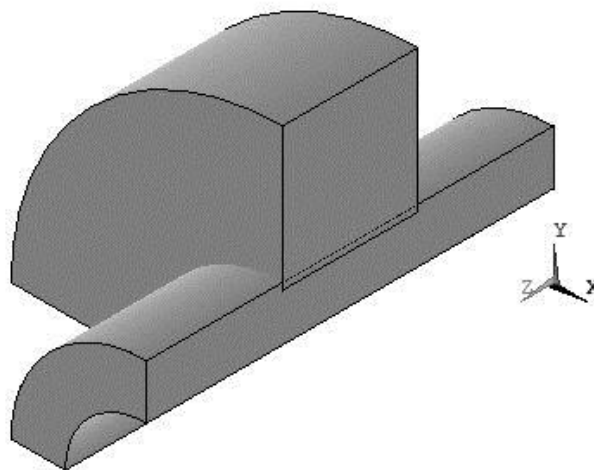


Рис. 1. Элементы конструкции, соединенные посадкой с натягом

Рассмотрим основные особенности перечисленных этапов.

Выбор типа конечного элемента. В качестве конечного элемента использовался Solid45 (Brick 8node 45). Это пространственный элемент с шестью гранями и восемью узлами, расположенными по углам. Он может быть использован для расчета конструкций из изотропных материалов, обладающих упругими или упругопластическими свойствами.

Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete→Add→Structural→Solid → Brick 8 node 45→OK.

Выбор свойств механических характеристик материала элементов конструкции. Для материалов вала и втулки выбрана изотропная модель линейного упругого деформирования (закон Гука). Модель материала с билинейным кинематическим упрочнением и переходом из упругого состояния в пластическое по критерию Мизеса в данной задаче нецелесообразна, поскольку не позволяет определить опасные участки при превышении напряжениями предела текучести в нескольких зонах элементов конструкции [3, 4].

Material Props→ Material Models→Structural→Linear→Elastic→Isotropic→EX→2E11→PRXY→0.3→OK.

Построение геометрических моделей вала и втулки.

Построение внутреннего полого цилиндра (вала).

Main Menu→Preprocessor→Modeling Create→Volumes Cylinder →Partial Cylinder

Rad-1 .06

Theta-1 90

Rad-2 .1

Theta-2 180

Depth .3 OK.

При формировании объемных примитивов основание объекта всегда находится в рабочей плоскости. Для построения второго цилиндра соосно первому со смещением

относительно него по оси для заданных высот вала и втулки необходимо передвинуть рабочую плоскость на 0,1 м:

ANSYS Utility Menu→Workplane→Offset WP by Increments

X,Y,Z offsets 0., 0., .1 OK.

Построение внешнего полого цилиндра (втулки).

Main Menu→Preprocessor→Modeling Create→Volumes Cylinder→Partial Cylinder

Rad-1 .0999

Theta-1 90

Rad-2 .2

Theta-2 180

Depth .1 OK.

Конечно-элементное разбиение геометрической модели. Для обеспечения реализации решения на учебных версиях ANSYS используется достаточно грубое разбиение, что не гарантирует возможность анализа эффектов концентрации напряжений в зоне контакта торцов внешнего цилиндра с боковой поверхностью внутреннего.

Main Menu→Preprocessor→Size Ctrls→Picked Lines

выбрать все радиальные длинного цилиндра **Apply**

No of Element Divisions NDIV 3 Space Spacing Ratio 2 Apply

выбрать все радиальные полого цилиндра **Apply**

No of Element Divisions NDIV 3 Space Spacing Ratio .5 Apply

выбрать любую образующую короткого цилиндра **Apply**

No of Element Divisions NDIV 4 Space Spacing Ratio 1 Apply

выбрать все образующие длинного цилиндра **Apply**

No of Element Divisions NDIV 10 Space Spacing Ratio -.5 Apply

выбрать любую окружную длинного и короткого **Apply**

No of Element Divisions NDIV 8 Space Spacing Ratio 1 OK

Main Menu→Preprocessor→Mesh→Volumes→Mapped→4 to 6 Sided→Pick All

Конечно-элементное разбиение модели приведено на рис. 2.

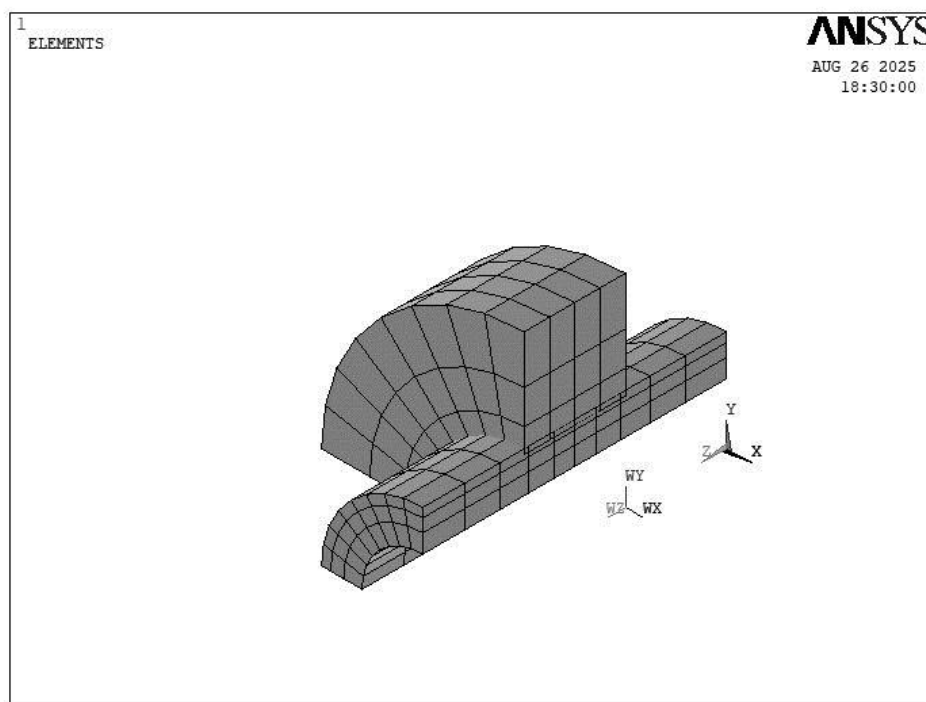


Рис. 2. Конечно-элементное разбиение модели

Создание контактных пар с использованием Contact Wizard. Для моделирования контактного взаимодействия в системе ANSYS используется инструмент «мастер контакта» (Contact Wizard). Контактные задачи, как правило, являются существенно нелинейными. Нелинейность контактных задач связана с тем, что область контакта, а следовательно, и граничные условия до получения решения являются неизвестными [5, 6]. Решаемая задача является исключением, поскольку поверхность контакта известна до получения решения. Данная контактная задача относится к классу «деформируемое тело к деформируемому» с типом контакта «поверхность - поверхность». Система ANSYS при создании контактных конечных элементов использует понятия «целевая поверхность» и «контактная поверхность». Эти поверхности образуют контактную пару:

- целевая поверхность моделируется элементами TARGE170;
- контактная поверхность моделируется элементами CONTA174.

Эти конечные элементы отличаются друг от друга своей ролью в алгоритме решения контактной задачи. Контактные элементы не могут проникать сквозь целевые, тогда как целевые могут проникать через контактные.

Main Menu→ Preprocessor→ Modeling>Create→ Contact Pair→ Contact Wizard

В открывшемся окне выберите установки: **Areas→ Flexible→ Pick Target→** Выберите мышкой внутреннюю поверхность короткого цилиндра (**Area 10**) – или наберите в командной строке **10 → Enter→ OK.**

Нажмите **Next→** установите **Areas→ Pick Contact.**

Выберите мышкой внешнюю поверхность длинного цилиндра (**Area 3**) – или наберите в командной строке **3 → Enter→ OK** Нажмите **Next.**

В открывшемся окне:

Укажите номер материала ID **1**

Укажите коэффициент трения **0.1**

Проверьте включение алгоритма начального проникновения (**Initial penetration**).

Установите опции (в текущей задаче этого не требуется): **Optional Setting→ Parameters→Normal penalty stiffness1→Penetration tolerance 0.1 OK.**

Создать элементы **Create** (генерируются элементы TARGE170 на целевой поверхности и CONTA174 на контактной поверхности).

Выход **Finish.**

Для контроля создания и ориентации контактных элементов их можно визуализировать:

Main Menu → Preprocessor→ -Modeling>Create→ Contact Pair→ View Pair→ (Contact Pair - Normals Shown)→ Display.

Приложение граничных условий и условий симметрии.

Приложение условий симметрии:

Loads→Apply→Structural Displacement→ Symmetry BC→on Areas.

Выберите все боковые поверхности (радиальные) втулки и вала→**OK.**

Pan Zoom Rotate→Bot.

Приложение граничных условий к узлам (рис. 3):

Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes→Box

Выделите курсором все узлы по плоскости симметрии, перпендикулярной продольной оси элементов конструкции (посередине)→**OK→**, выберите степень свободы **UZ OK.**

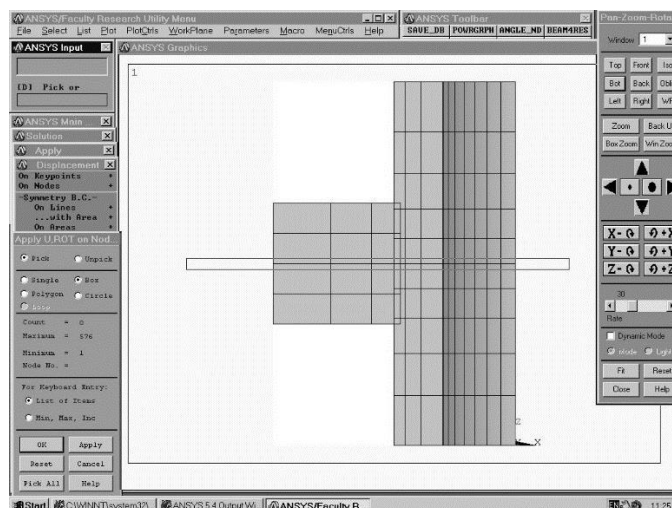


Рис. 3. Приложение граничных условий к узлам

Задание параметров решения и его реализация.

Solution→**Sol'n Controls**→ выбрать **Basic**, заполнить в соответствии с рис. 4,

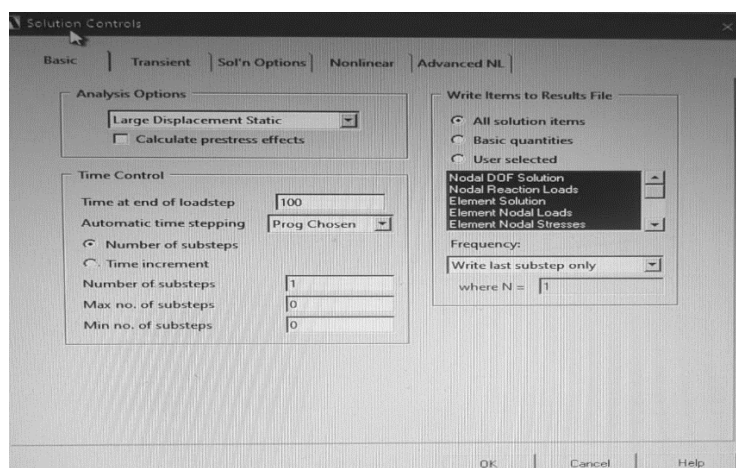


Рис. 4. Задание параметров решения и его реализация

выбрать **Sol'n Options**, заполнить как на рис. 5,

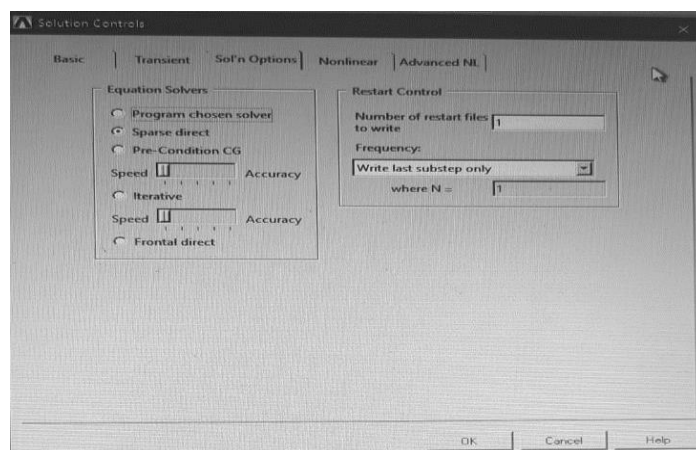


Рис. 5. Задание параметров решения и его реализация

выбрать **Nonlinear**, заполнить по рис. 6, **OK**.

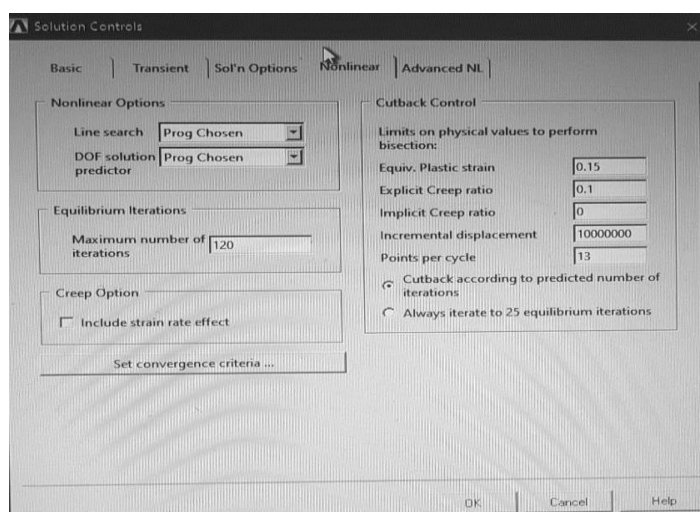


Рис. 6. Задание параметров решения и его реализация

Solve→Current LS.

Закройте окно листинга → нажмите **OK**.

После появления сообщения “**Solution is Done**” нажмите “**Close**” в этом окне.

Просмотр полученных результатов расчета (постпроцессинг).

Main Menu→General PostProc.

Для оценки напряженного состояния материала элементов конструкции наиболее информативной является величина эквивалентных напряжений по четвертой (энергетической) теории прочности, или напряжений по Мизесу. Для просмотра этих напряжений выбираем в главном меню:

Plot Results→Nodal Solution→Stress von Mises SEQV→OK

Распределение напряжений по Мизесу показано на рис. 7.

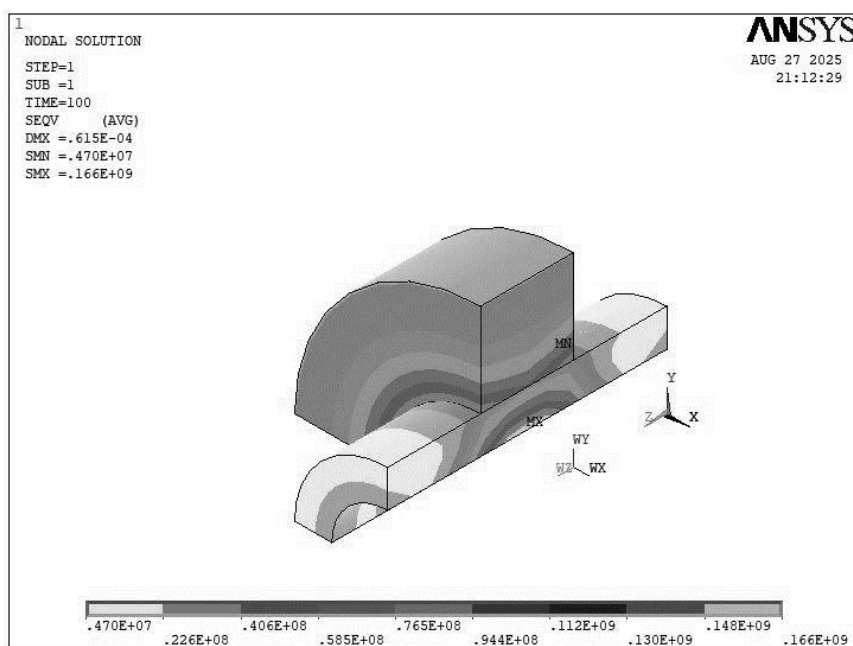


Рис. 7. Эквивалентные напряжения по Мизесу

В данной задаче максимальная величина эквивалентных напряжений по Мизесу составила 166 МПа, что меньше величины предела текучести для всех марок конструкционных сталей.

Для удобства просмотра результатов расчета для элементов группы “контактная поверхность” необходимо выбрать только элементы соответствующего типа (2 для TARGE 170 или 3 для CONTA 174).

Utility Menu→Select→Elements→By attributes→Element type Num введите 2 или 3 → **OK**.

Просмотр контактных напряжений (рис. 8):

Plot Results→Nodal Solution→Contact→Total Stress STOT → OK.

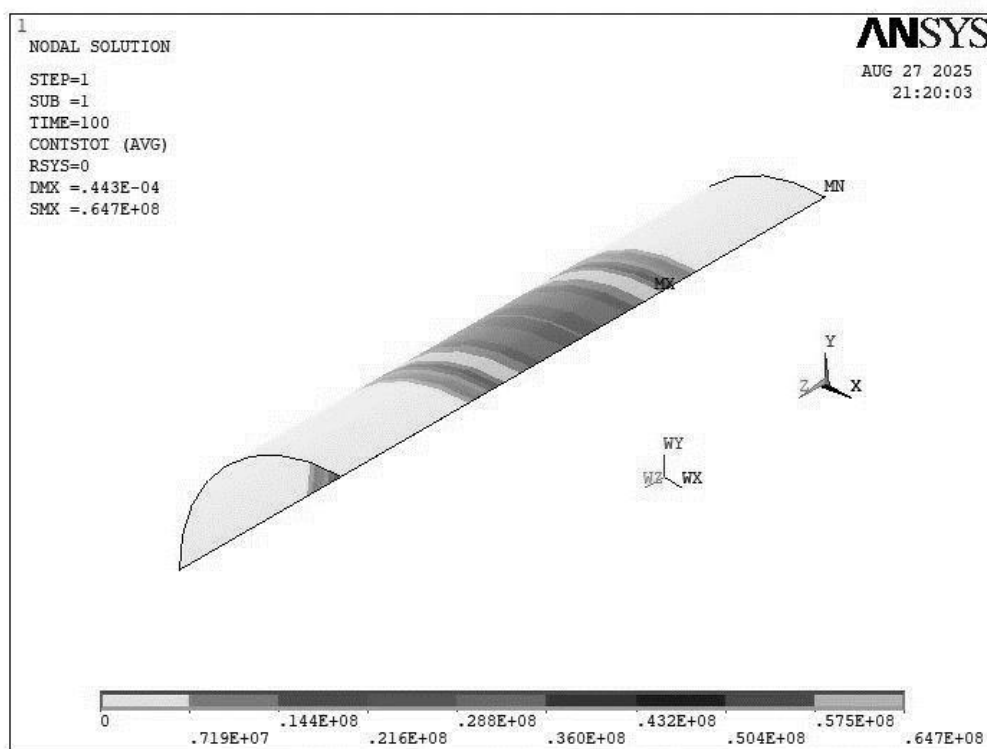


Рис. 8. Контактные напряжения

Максимальна величина контактных напряжений (нормальных напряжений на поверхностях контакта) составляет примерно 65 МПа.

Список литературы

1. **Маклаков, С. Ф.** Использование свойств материалов для обеспечения безопасной эксплуатации транспортных средств / Маклаков С. Ф., Мишин В. А., Яицков И. А. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 501-508.
2. **Кротов, С. В.** Транзиентный анализ в ANSYS//Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство: тр. Международной научно-практической конференции «Транспорт:

References

1. **Maklakov, S. F.** Using the properties of materials to ensure safe operation of vehicles / Maklakov S. F., Mishin V. A., Yaitskov I. A. // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. 2024. No. 1. P. 501-508.
2. **Krotov, S. V.** Transient analysis in ANSYS//Collection of scientific papers “Transport: science, education, production: tr. International scientific and practical conference “Transport: science, education,

наука, образование, производство» (Транспорт-2017) / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2017. – Том 3: Естественные и технические науки. – С. 247 – 250.

3. **Личковаха, А. С.** К определению энергетического баланса нелинейной упругой системы / А. С. Личковаха, Б. А. Шемшюра, С. А. Кузнецов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения – 2018. – №2. – с.137-143.

4. **Маклаков, С. Ф.** Выбор рациональных параметров конструктивно-силовой схемы шатуна с помощью ANSYS/ С. Ф. Маклаков, В. А. Мишин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 97 – 102.

5. **Маклаков, С. Ф.** К расчету пластических энергопоглощающих элементов в виде дорновой пары / Маклаков С. Ф., Мишин В. А., Яицков И. А. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. № 4. С. 384-392.

6. **Lagunova, E. O.** Calculated model of wedge-shaped sliding supports taking into account rheological properties of viscoelastic lubricant / K. S. Akhverdiev, E. O. Lagunova, M. A. Mukutadze // Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018). – 2018. – pp. 246-253.

production" (Transport-2017) / FSBEI HE RGUPS. - Rostov on Don, 2017. - Volume 3: Natural and technical sciences. - P. 247 - 250.

3. **Lichkovakha, A. S.** On the determination of the energy balance of a nonlinear elastic system / A. S. Lichkovakha, B. A. Shemshura, S. A. Kuznetsov // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta puty soobshcheniya - 2018. - No. 2. - pp. 137-143.

4. **Maklakov, S. F.** Selection of rational parameters of the structural-power scheme of the connecting rod using ANSYS / S. F. Maklakov, V. A. Mishin // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta puty soobshcheniya. - 2024. - No. 4. - P. 97 - 102.

5. **Maklakov, S. F.** On the calculation of plastic energy-absorbing elements in the form of a mandrel pair / Maklakov S. F., Mishin V. A., Yaitskov I. A. // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. 2025. No. 4. P. 384-392.

6. **Lagunova, E. O.** Calculated model of wedge-shaped sliding supports taking into account rheological properties of viscoelastic lubricant / K. S. Akhverdiev, E. O. Lagunova, M. A. Mukutadze // Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018). – 2018. – pp. 246-253.

S. F. Maklakov, V. A. Mishin

STRESS-STRAIN ANALYSIS OF Structural ELEMENTS DURING INTERFERENCE FITS USING ANSYS

Abstract. This article presents a method for solving a contact problem for determining stresses and strains in structural elements connected by an interference fit, using the ANSYS finite element software package. The contacting elements are geometrically represented by thick-walled hollow cylinders, with the outer diameter of the inner cylinder (shaft) being larger than the inner diameter of the outer cylinder (sleeve). The investigated range of initial penetration (interference) was 0.1 mm to 1 mm. The normal stresses on the contact surface, the equivalent von Mises stresses in the contacting elements, and the total strains in them were determined.

Keywords: Contact problem of deformable surfaces, contact finite elements, equivalent stresses, energy theory of strength, equilibrium state during initial penetration.

For citation: Maklakov, S. F. Stress-Strain Analysis of Structural Elements During Interference Fits Using Ansys / S. F. Maklakov, V. A. Mishin // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 120–128. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_120.

Сведения об авторах**Маклаков Сергей Федорович**

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Строительная механика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: maklakovsf@mail.ru

Мишин Валентин Алексеевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Строительная механика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: mishin-1949@mail.ru

Information about the authors**Maklakov Sergei Fedorovich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Structural Mechanics»,
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor,
e-mail: maklakovsf@mail.ru

Mishin Valentin Alekseevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Structural Mechanics»,
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor,
e-mail: mishin-1949@mail.ru

К. А. Никулин, П. В. Шепелин

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ РЕМОНТА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация. В статье оценены перспективы современных тенденций и инновационных подходов к ремонту тяговых электродвигателей (ТЭД). Рассмотрены направления развития технологий ремонта. Практическая значимость работы заключается в возможности применения представленных рекомендаций для повышения качества ремонта и срока службы тяговых электродвигателей.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, ремонт, интеллектуальные системы, автоматизация, цифровые технологии.

Для цитирования: Никулин, К. А. Современные тенденции развития ремонта тяговых электродвигателей / К. А. Никулин, П. В. Шепелин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 129–136. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_129.

Проведенный анализ работы ТЭД на полигоне обращения электровазов постоянного тока сведенный в таблицу 1 и рис. 1 показал, что основная доля отказов электрических машин в эксплуатации приходится на якорь, а именно его межвитковые замыкания и на изоляцию – ее пробой и перегрев.

Таблица 1

Статистика отказов ТЭД по узлам

Узел ТЭД	Доля отказов, %	Основные виды дефектов
Коллектор	12,3	Износ пластин, искрение, замыкания между ламелями
Изоляция	22,1	Пробой изоляции, снижение сопротивления, перегрев
Щетки	7,3	Износ графитовых элементов, нестабильный контакт
Якорь	58,3	Межвитковые замыкания, разбалансировка, перегрев

А обработка данных о причинах отказов, сведенные в таблицу 2 и рис. 2. выявило, что лимитирующим фактором возникновения отказов в эксплуатации является некачественно проведенный ремонт, а остальные причины, такие как условия эксплуатации и нарушение межремонтных пробегов, только усугубляют статистические показатели.

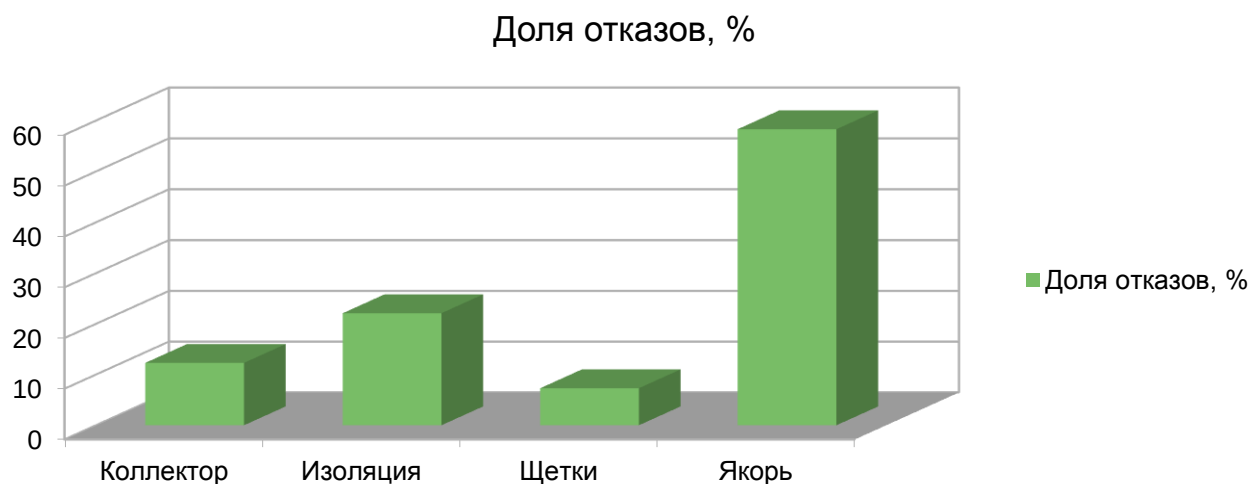


Рис. 1. Доля отказов узлов ТЭД

Таблица 2

Статистика причин отказов ТЭД

Узел ТЭД	Доля отказов, %	Описание
Качество ремонта	39,7	Нарушение технологии ремонта, несоблюдение последовательности операций, несогласованность межремонтных пробегов.
Условия эксплуатации и техническое обслуживание	24,5	Перегрузки, загрязнение, нарушение норм технического обслуживания.
Нарушение межремонтных пробегов	16,5	Несогласованность с документами, фактическое превышение пробегов до ТР.
Конструктивно-технологические факторы	10,2	Недостаточная отработка узлов, несовершенство конструкции.
Старение и выработка ресурса	9,1	Снижение сопротивления изоляции, разрушение бандажа, ослабление креплений.

Исходя из вышеприведенного анализа в статье были рассмотрены современные и инновационные технологии ремонта ТЭД, которые возможно применить на ремонтных предприятиях для повышения качества ремонта и соответственно уменьшения количества отказов ТЭД в эксплуатации.

На первом этапе следует выделить основные элементы ТЭД, совершенствование технологии ремонта которых требует новых подходов на предприятиях.

В настоящее время, в развитии ремонтных производств железнодорожного транспорта, отмечается устойчивая тенденция к модернизации оборудования и методов ремонта тяговых электродвигателей с целью повышения производительности, точности и стабильности качества выполняемых операций [1, 5]. В ремонтных депо и на специализированных предприятиях реализуется переход от традиционных технологий к комплексным автоматизированным и цифровым решениям, обеспечивающим воспроизводимость результатов и возможность последующего анализа данных о ремонтах.



Рис. 2. Доля причин отказов ТЭД

Обработка коллектора. Щеточно-коллекторный узел – один из самых уязвимых элементов тягового электродвигателя. Для повышения его надежности разрабатываются электрофизические методы обработки. В технологии науглероживания медных пластин коллектора с использованием электроэрозионной обработки (электроискровой обработки), на поверхности медных коллекторных пластин формируется тонкий углеродистый слой путём подачи импульсов между угольным электродом и медной пластиной [6]. Такая обработка улучшает коммутационные характеристики машины и увеличивает износостойкость коллектора. При электроискровой обработке достигается высокая точность геометрических параметров (диаметра рабочей поверхности, высота коллекторных пластин, межламельные расстояния) и качество поверхности коллектора, минимальный дефектный слой и сравнительно лёгкая автоматизация процесса. Исследования показывают, что применение этой технологии позволяет существенно повысить износостойкость коллектора и продлить ресурс работы ТЭД постоянного тока. Поверхностное пластическое деформирование коллекторных пластин, которое упрочняет поверхностный слой за счет холодного деформирования, повышает усталостную прочность и снижает вероятность возникновения трещин. Также активно развивается применение нанокompозитных покрытий [4], где в медную основу вводятся дисперсные наночастицы тугоплавких металлов, что существенно повышает износостойкость и термостойкость коллектора.

В условиях локомотивных депо традиционно упрочнение поверхности коллектора не производится – обычно коллектор обтачивают и шлифуют, не применяя специальных упрочняющих покрытий. Предлагаемые инновации (науглероживание, плазменно-напылительные покрытия) пока не вошли в технологию депоовского ремонта, хотя демонстрируют потенциал для повышения надёжности [6]. Другие современные методы ремонта включают автоматизированный контактный ремонт обмоток (компьютеризированную намотку), использование лазерных или ультразвуковых методов очистки коллекторных пластин, применение высокотехнологичных графитовых материалов для щёток. Данные разработки активно ведутся научно-исследовательскими институтами. Промышленные предприятия рассматривают возможности применения указанных методов при ремонте и модернизации тяговых электродвигателей. Внедрение электроискровых и плазменных технологий рассматривается в составе программ по повышению ресурса и надёжности электрических машин. В депоовской практике данные методы пока реализуются на стадии опытного внедрения.

Автоматизация процесса балансировки. Современные балансировочные установки, оснащаются промышленными контроллерами, сенсорными панелями и программным обеспечением для анализа спектров вибрации и автоматического расчёта корректирующих масс [1]. Подобные решения представлены, например, в балансировочных системах отечественных производителей, а также зарубежных компаний Schenck RoTec (Германия) и СЕМВ (Италия). Такие системы позволяют стандартизировать операции балансировки, исключить субъективные ошибки персонала и повысить точность устранения динамического

дисбаланса роторов. В деповской практике применяются как стационарные балансировочные комплексы, так и переносные модули, адаптированные для использования непосредственно в ремонтных участках. Развивается направление внедрения автоматических установок для динамической балансировки с адаптивным управлением. Такие установки способны в режиме реального времени корректировать вращение ротора на основе данных вибродатчиков, без необходимости его демонтажа. Аналогичные подходы исследуются в работах ученых транспортных ВУЗов, где рассматриваются возможности интеграции систем адаптивной балансировки в общую цифровую платформу ремонта тяговых электродвигателей. Это особенно актуально для ремонтных депо, где снижение времени на технологические операции напрямую влияет на производительность и себестоимость ремонта. Автоматизация процесса балансировки, в сочетании с цифровым архивом параметров каждого электродвигателя, формирует основу для интеллектуальной системы контроля качества ремонта и позволяет переходить к более высокому уровню стандартизации ремонтных процессов.

Аддитивные технологии. В сфере ремонта и модернизации тяговых электродвигателей стремительно развивается применение аддитивных и трёхмерных технологий, открывающее новые возможности для повышения эффективности и сокращения сроков ремонтных процессов [4]. Использование 3D-печати позволяет изготавливать сложные и индивидуальные элементы непосредственно на месте эксплуатации, без привлечения внешних производственных предприятий, что особенно важно для редких или снятых с производства компонентов. Перспективным направлением является развитие гибридных технологий, совмещающих аддитивное формирование деталей с последующей механической обработкой, что обеспечивает высокую точность, улучшенные эксплуатационные характеристики и снижение себестоимости ремонта.

Ведущие зарубежные компании, такие как ExOne, Maxxxwell и Additive Drives, уже демонстрируют потенциал аддитивных технологий при производстве компонентов электрических машин: от печати медных катушек с оптимизированным тепловым отводом до изготовления статоров прототипов тяговых двигателей, что позволило существенно сократить сроки изготовления. На данный момент эти решения преимущественно применяются на этапе проектирования, их адаптация для ремонтных депо открывает перспективу сокращения времени простоя подвижного состава и повышения технической готовности локомотивов. Дополнительно применение 3D-печати и цифрового моделирования обеспечивает объективную оценку износа и деформаций деталей, способствует созданию цифровых двойников узлов и повышает точность дефектовки. Интеграция трёхмерных моделей с системами технической диагностики и управления ремонтом формирует основу для цифрового сопровождения тяговых электродвигателей на всём жизненном цикле — от эксплуатации до капитального ремонта. В России исследования и прикладные разработки в области аддитивных технологий для электрических машин ведутся во многих транспортных и научно-производственных центрах. Железнодорожные предприятия разрабатывают тестовые проекты по изготовлению деталей, оснастки и крепёжных элементов с помощью 3D-печати. Внедрение аддитивных технологий для восстановления или изготовления элементов тяговых электродвигателей могут быть реализованы в локомотивных депо в ближайшие годы, при создании специализированных производственных участков и разработке нормативной базы.

Восстановление изоляции. Современные установки пропитки и вакуумной сушки, обеспечивают строгое соблюдение температурно-временных режимов, фиксируемых электронным протоколом. Это исключает вероятность перегрева или недосушки обмоток и повышает стабильность диэлектрических характеристик изоляции [5]. Автоматическое регулирование параметров процесса и регистрация кривых температуры и давления создают заготовку для внедрения цифровых систем контроля качества ремонта на уровне технологического цикла. Установки для пропитки оснащаются прецизионными температурными анализаторами, которые обеспечивают многоточечный контроль

температурного поля по всему объему обмотки в процессе сушки и пропитки. Это исключает локальные перегревы и обеспечивает равномерность полимеризации изоляционных материалов. Для комплексного обслуживания изоляции внедряются диагностико-ремонтные комплексы, объединяющие средства диагностики, очистки и восстановления изоляции в единый технологический цикл.

Применение изоляционных лент последнего поколения позволяет значительно повысить характеристики системы изоляции обмотки якоря. После бандажирования обмотки якоря сухими лентами применяется вакуумно-нагнетательная пропитка (VPI): сочетание вакуума и избыточного давления обеспечивает максимальное проникновение компаунда в изоляцию обмотки, заполняет все воздушные полости между витками и увеличивает жесткость намотки, уменьшая тангенс угла диэлектрических потерь. Разработки и внедрение технологий вакуумно-нагнетательной пропитки, сушки и восстановления изоляции выполняются в научно-производственных организациях и на предприятиях железнодорожного машиностроения, а также в производственных подразделениях локомотивостроительных заводов. Опыт промышленного применения установок вакуумной пропитки имеется также на ряде локомотиворемонтных заводов, где используются отечественные установки пропитки и сушки. Реализация проектов по модернизации технологических линий пропитки и внедрению цифрового контроля параметров процесса, в перспективе поспособствует повышению надёжности изоляции и стабильности её диэлектрических характеристик.

Цифровая диагностика и предиктивное обслуживание. Современные тенденции в ремонте ТЭД предполагают внедрение цифровых технологий для диагностики и прогноза отказов. В ремонтной практике применяются решения с «умными» IoT-датчиками: мониторинг температуры, вибрации и тока в режиме реального времени для прогнозной диагностики. Системы оснащаются беспроводными модулями передачи данных и интегрируются в локальные сети предприятия, что позволяет осуществлять дистанционный контроль за состоянием оборудования. Использование облачных платформ для сбора и анализа данных обеспечивает доступ к информации в любой момент времени, независимо от их местоположения. Развивается концепция цифрового двойника: построения виртуальной модели электродвигателя для имитации процессов износа и прогноза последствий различных стратегий ремонта. На основе результатов испытаний, трёхмерных геометрических моделей и данных эксплуатации формируется цифровой двойник, с помощью которого возникает возможность в проведении оптимизации режимов работы и контроля технического состояния электродвигателя [2]. Такой подход позволяет проводить оценку износа, исключая полную дефектацию на практике. Значительное внимание уделяется интеграции приборов неразрушающего контроля в технологический процесс ремонта. Применение оптоэлектронных анализаторов искрения, позволяющих визуализировать коммутационные процессы в коллекторных машинах постоянного тока, а также портативных виброанализаторов и тепловизоров, позволят оперативно устранять скрытые дефекты. Использование оптоэлектронных методов контроля искрения способствует снижению числа рекламаций и повторных ремонтов за счёт объективизации оценки состояния щеточно-коллекторного узла.

В локомотивном депо диагностика состояния ТЭД зачастую ограничена визуальным контролем и традиционными измерениями (измерение сопротивления изоляции, обточка коллектора по шаблону), что не позволяет объективно оценить остаточный ресурс машины. Применение автоматизированных средств для контактной и бесконтактной диагностики позволило бы более достоверно определять техническое состояние узлов. Интеграция информационных систем позволяет фиксировать результаты диагностики и данных эксплуатации, образуя «большие данные» для последующей аналитики состояния парка ТЭД. На основе анализа массивов данных возможно построение прогнозных моделей надёжности.

Внедрение подобных технологий в проектах ОАО «РЖД» в перспективе позволят повысить межремонтные пробеги локомотивов.

Цифровизация процессов учёта и предремонтного анализа данных. Крупные депо и ремонтные предприятия переходят к ведению электронных журналов дефектов и баз данных результатов стендовых испытаний. Такие решения позволяют обеспечить систематизацию и долговременное хранение информации о каждом ремонтном цикле, включая параметры испытаний, результаты измерений, информацию об узлах и агрегатах. На основе накопленных данных формируются аналитические отчёты, позволяющие выявлять закономерности возникновения дефектов и определять узкие места в технологии ремонта

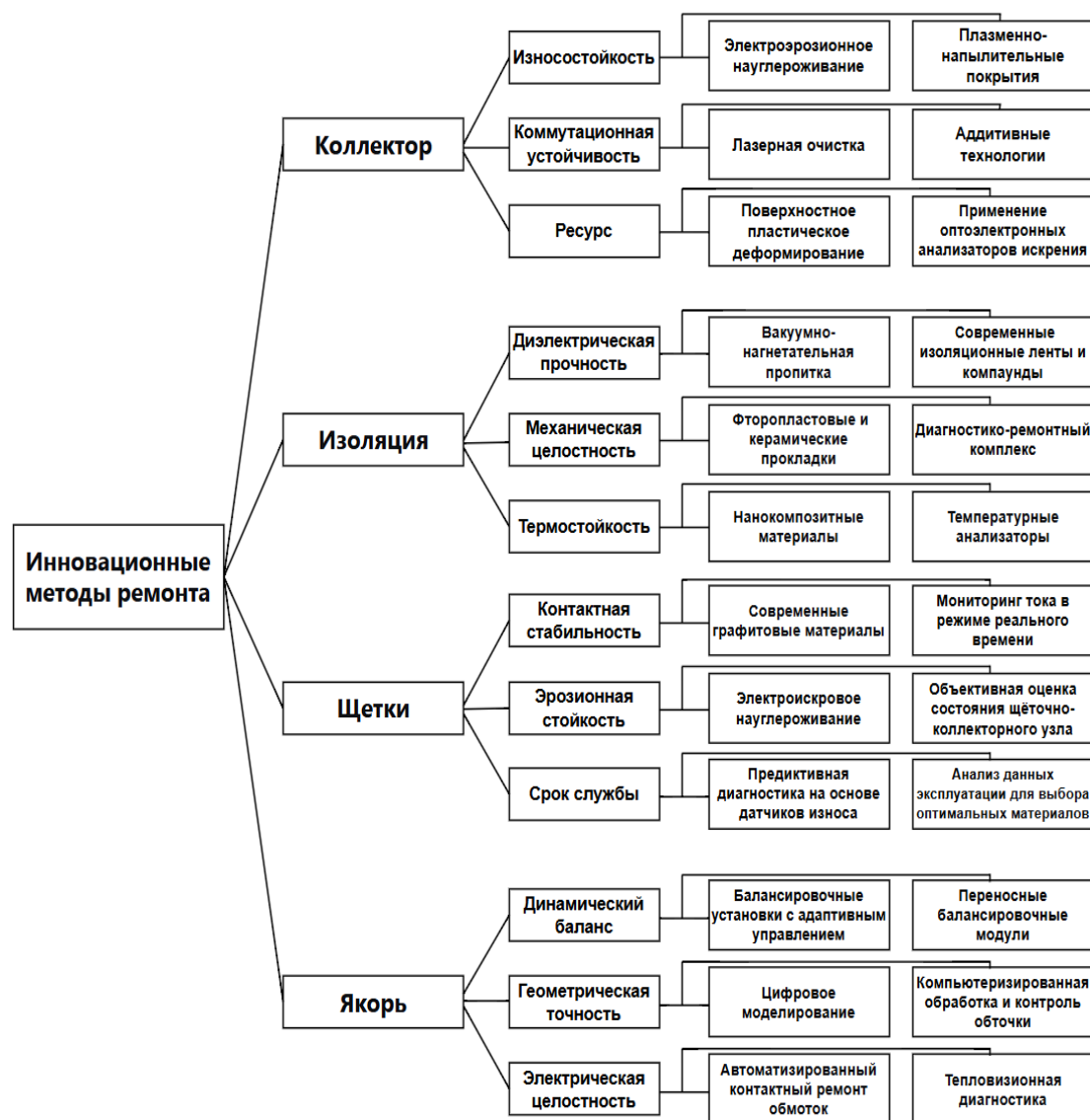


Рис. 3. Инновационные методы ремонта

Российские IT-компании, предлагают решения для промышленной аналитики и систем поддержки принятия решений на основе машинного обучения. Применение данных инструментов в перспективе позволит перейти от традиционного планового ремонта к модели «ремонта по техническому состоянию», при которой решения о восстановлении или замене элементов принимаются на основании статистических прогнозов и анализа вероятности отказов [3].

Внедрение цифровых систем учёта и предремонтного анализа способствует формированию единого информационного пространства локомотивного депо. Интеграция

данных с измерительных стендов, балансировочных и испытательных установок в централизованную базу позволяет создавать цифровой паспорт каждого тягового электродвигателя, что обеспечит полную прослеживаемость технического состояния агрегата на протяжении всего срока службы. В практике железнодорожного транспорта ОАО «РЖД» реализована стратегия цифровой трансформации, в которой используются цифровые платформы для диагностики и мониторинга состояния активов, включая предиктивную аналитику и цифровые двойники подвижного состава.

Заключение. Современные тенденции ремонта ТЭД демонстрируют переход ремонтных подразделений от ручного и эмпирического подхода к методам, основанным на научном обосновании и цифровых технологиям управления процессом ремонта. Внедрение автоматизации, стандартизации испытаний, интеграции средств неразрушающего контроля и цифровизации данных формирует основу для последующего внедрения интеллектуальных систем поддержки принятия решений. В ближайшей перспективе, комбинация традиционных ремонтных технологий с интеллектуальными алгоритмами анализа данных, позволит существенно повысить надёжность и эффективность ремонта тяговых электродвигателей локомотивов.

По результатам анализа можно выделить следующие тенденции в улучшении ремонта ТЭД, такие как: аддитивные технологии; нанокompозитные материалы; предиктивная диагностика; цифровое моделирование, которые будут активно развиваться в ближайшие 5-7 лет.

На основе анализа современных технологий можно сформировать ряд направлений для дальнейшего развития ремонтного блока по тяговым электрическим двигателям электропоездов постоянного тока представленных на рис. 3.

Список литературы

1. Данковцев, В. Т. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. Т. Данковцев, В. И. Киселев, В. А. Четвергов – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2007. – 558 с.
2. Андрончев, И. К. Моделирование электрических процессов в силовых цепях локомотивов с двигателями постоянного тока / И. К. Андрончев, И. П. Гордеев, П. В. Шепелин // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 2(80). – С. 7-15. – EDN HEEJYE.
3. Разработка метода оценки надежности работы тяговых электродвигателей с целью оптимизации системы планово-предупредительного ремонта трамвайных вагонов, выработавших свой ресурс / Е. В. Шищенко, В. Н. Водолазов, В. М. Руцкий, П. В. Шепелин // Вестник СамГУПС. – 2016. – № 1(31). – С. 51-55. – EDN VSCWTR.
4. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital

References

1. Dankovtsev, V. T. Technical maintenance and repair of locomotives: Textbook for higher education institutions of railway transport / V. T. Dankovtsev, V. I. Kiselev, V. A. Chetvergov - M.: State Educational Institution "Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport", 2007. - 558 p.
2. Andronchev, I. K. Modeling of electrical processes in power circuits of locomotives with DC motors / I. K. Andronchev, I. P. Gordeev, P. V. Shepelin // Bulletin of Transport of the Volga Region. - 2020. - No. 2 (80). - P. 7-15. - EDN HEEJYE.
3. Development of a method for assessing the reliability of traction electric motors in order to optimize the system of scheduled preventive maintenance of tram cars that have exhausted their service life / E. V. Shishchenko, V. N. Vodolazov, V. M. Rutsky, P. V. Shepelin // Bulletin of Samara State University of Railways. - 2016. - No. 1 (31). - P. 51-55. - EDN VSCWTR.
4. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital

Manufacturing (2021) Springer, 3rd ed., DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7

5. Грищенко, А. В. Электрические машины и преобразователи подвижного состава: учебник для студенческих учреждений / А. В. Грищенко, В. В. Стрекопытов. – М.: Академия, 2005. – 320 с.

6. Повышение надежности работы тяговых электродвигателей локомотивов за счет применения электроискровой обработки коллекторных пластин / Ю. В. Титов, Д. Ю. Белан, Г. Б. Тодер, А. О. Отраднова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 16-24. – ISSN: 1994-6309

Manufacturing (2021) Springer, 3rd ed., DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7

5. Grishchenko, A. V. Electrical machines and converters of rolling stock: a textbook for student institutions / A. V. Grishchenko, V. V. Strekopytov. – M.: Academy, 2005. – 320 p.

6. Improving the Reliability of Locomotive Traction Motors through the Use of Electrospark Machining of Commutator Plates / Yu. V. Titov, D. Yu. Belan, G. B. Toder, A. O. Otradnova // Metal Processing (Technology, Equipment, Tools). – 2019. – Vol. 21, No. 1. – Pp. 16-24. – ISSN: 1994-6309

K. A. Nikulin, P. V. Shepelin

MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF TRACTION ELECTRIC MOTOR REPAIR

Abstract. The article examines modern trends and innovative approaches to the repair of traction electric motors. It explores promising directions for the development of repair technologies. The practical significance of the work lies in the possibility of applying the presented recommendations to improve the quality of repairs and increase the inter-repair intervals of traction electric motors.

Keywords: traction electric motor, repair, intelligent systems, automation, digital technologies.

For citation: Nikulin, K. A. Modern Trends in the Development of Traction Electric Motor Repair / K. A. Nikulin, P. V. Shepelin // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsheniya. – 2025. – № 4. – P. 129–136. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_129.

Сведения об авторах

Никулин Кирилл Александрович

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), кафедра «Тяговый подвижной состав», аспирант,
e-mail: jakenikulin2402@gmail.com

Шепелин Павел Викторович

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), кафедра «Тяговый подвижной состав», кандидат технических наук, доцент,
e-mail: shepelin@samgups.ru

Information about the authors

Nikulin Kirill Alexandrovich

Volga State Transport University (VSTU), Chair «Traction Rolling Stock», Postgraduate student,
e-mail: jakenikulin2402@gmail.com

Shepelin Pavel Viktorovich

Volga State Transport University (VSTU), Chair «Traction Rolling Stock», Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: shepelin@samgups.ru

А. К. Пляскин, А. А. Потапов

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ КАК КРИТЕРИЙ ПОСТАНОВКИ ЛОКОМОТИВА ПОД ПОЕЗД

Аннотация. В статье рассмотрен частный случай задачи о назначениях – задача о постановке локомотива под один поезд. В качестве решения предлагается использовать показатели надёжности локомотива. В настоящее время совокупность требований к надёжности локомотивов, установленная нормативно-технической и конструкторской документацией, фактически составляет эталонную модель надёжности локомотива. Данная модель используется для совершенствования ТОиР и процесса эксплуатации, но не применяется при выборе локомотива для постановки под поезд. В связи с этим на основе отдельных показателей надёжности предлагается рассчитать коэффициент технического состояния $K_{ТС}$ и на его основе оценивать возможность постановки локомотива под поезд. Выполнено сравнение $K_{ТС}$ нескольких локомотивов. Данное решение является одним из возможных способов интеллектуализации управления движением и тягой.

Ключевые слова: показатели надёжности, эталонная модель, управление движением, интеллектуализация, постановка локомотива под поезд, проблема о назначениях, ТОиР.

Для цитирования: Пляскин, А. К. Показатели надёжности как критерии постановки локомотива под поезд / А. К. Пляскин, А. А. Потапов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 137–146. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_137.

Введение. В наши дни все чаще применяются интеллектуальные методы и алгоритмы управления движением и тягой. Предлагаются различные решения по созданию систем поддержки принятия решений в процессе управления перевозками [1], в ОАО «РЖД» с 2013 года ведётся разработка и внедрение Единой интеллектуальной системы управления и автоматизации производственных процессов на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ) [2]. За рубежом также внедряются различные цифровые технологии в управлении тягой и техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) локомотивов [3]. Значимый потенциал «интеллектуализации» имеет задача по постановке локомотива под поезд.

Задача о назначениях. Проблема о назначении локомотивов под поезд – значимая проблема в управлении движением и тягой, за рубежом известная как Locomotive Assignment Problem (LAP). Обычно рассматривается проблема выбора оптимального локомотива из нескольких доступных под одну из ниток графика движения поездов или оптимальное распределение нескольких локомотивов по ниткам [4]. В качестве математической формализации этой задачи рядом авторов рассматривалась задача о назначениях (assignment problem): имеется определённое число работ (N) и определённое число исполнителей (M). Каждый исполнитель умеет выполнять некоторое количество P из этих работ (где $0 \leq P \leq N$), причём у каждого исполнителя качество выполнения работ отличается от остальных – какие-то работы он выполняет хуже, какие-то лучше. В рамках этой задачи требуется распределить работы между исполнителями так, чтобы эффективность их назначения на эти работы была максимальной. Для оптимального решения к каждой паре <работа, исполнитель> вводится функция полезности U_{ij} , как числовое выражение эффективности назначения исполнителя

на данную работу. Тогда задача о назначениях сводится к максимизации функции $\sum U_{ij}$. Очевидно, что под определённым числом работ понимаются нитки графика или поезда, под исполнителями – локомотивы [5].

Рассмотрим частный случай задачи о назначениях: имеется $N = 1$ поезд (1 работа), под который возможно поставить один из нескольких доступных локомотивов одной серии (M одинаковых исполнителей), в таком случае формально их способность выполнять предполагаемую работу одинакова $P_1 = P_2 = \dots = P_M$. В данном частном случае критерием наилучшего выбора исполнителя будет максимальное значение функции полезности $U_{ij\max}$ одного из исполнителей. Обычно в качестве критерия постановки выступает наличие локомотива, соответствие серии весовой норме поезда и т.д.

Однако ввиду большого количества отказов по парку локомотивов и его неравномерного технического состояния [6] в качестве значимого критерия при наличии выбора из нескольких локомотивов одной серии предлагается рассматривать наибольшую надёжность. Надёжность локомотивов особенно важна в условиях необходимости тяги соединённых поездов или поездов повышенной массы и длины. Отметим следующее: в настоящее время принято, если локомотивы состоят в эксплуатируемом парке, они надёжны в равной степени. Это следует из существующих нормативно-технических документов – ими не предусмотрено ранжирование локомотивов или выбор по надёжности из нескольких тяговых единиц одной серии эксплуатируемого парка при постановке локомотива под поезд [7]. Единственными критериями отказа в постановке локомотива под поезд является его явная неисправность или близость планового ТОиР.

Таким образом, надёжность не используется в качестве критерия при выборе локомотива под поезд в настоящее время, хотя очевидно, что она играет значимую роль и может быть использована для этой цели.

Эталонная модель надёжности локомотива. Надёжность локомотива нормируется государственными и отраслевыми стандартами, конструкторской документацией. Совокупность установленных требований по надёжности локомотивов фактически образует эталонную модель надёжности локомотива. Составные части эталонной модели следующие:

- Нормативные показатели надёжности локомотива в целом;
- Нормативная периодичность ТОиР локомотивов;
- Нормативные показатели износа, наработки на отказ и другие показатели

для отдельных узлов, агрегатов, систем.

Рассмотрим ряд требований эталонной модели к надёжности локомотивов в целом.

Для магистральных тепловозов показатели надёжности устанавливаются ГОСТ 31187-2011 «Тепловозы магистральные. Общие технические требования». Выдержка по нормируемым показателям приведена в таблице 1 [8].

Таблица 1

Нормируемые показатели надёжности магистральных тепловозов

Наименование показателя	Значение показателя для тепловоза	
	Пассажирского	Грузового
Средний параметр потока отказов в периоде нормальной эксплуатации тепловоза $1/10^6$ км, не более:		
- отказы первого вида	0,4	-
- отказы второго вида	1,0	2,0
- отказы третьего вида	10,0	11,0
Назначенный срок службы тепловоза до списания*, лет, не менее	40	
Объединённая удельная оперативная трудоёмкость технических обслуживаний и ремонтов, чел.·ч/ 10^3 км, не более	30	
Коэффициент технического использования, не менее	0,96	0,95
Коэффициент готовности, не менее	0,98	0,97
* При проведении модернизации в середине срока службы тепловоза		

Для серий тепловозов, производящихся с 2000-х годов такие показатели надёжности, как коэффициент внутренней готовности $K_{ВГ}$, коэффициент технической готовности $K_{ТГ}$, параметр потока отказов 1-го, 2-го и 3-го видов, средняя наработка на отказ приведены в их технических условиях, а также в приложении В методических положений для расчёта показателей безотказности и готовности локомотивов по результатам их эксплуатации, утверждённых распоряжением ОАО «РЖД» от 11.04.2019 N 704/р [9]. Пример выдержки из методических положений приведен в таблице 2.

Таблица 2

Числовые значения показателей надёжности, заданные в ТУ

Серия локомотива	Показатели надёжности					
	Коэффициент внутренней готовности $K_{ВГ}$	Коэффициент технической готовности $K_{ТГ}$	Параметр потока отказов 1-го вида $1/10^6 \text{ км}$	Параметр потока отказов 2-го вида $1/10^6 \text{ км}$	Параметр потока отказов 3-го вида $1/10^6 \text{ км}$ ($1/10^3 \text{ ч}$)	Средняя наработка на отказ, км
2ТЭ25А	0,97	0,95	-	2,0	11,0	-
2ТЭ25КМ	0,97	0,95	-	2,0	11,0	-
2ТЭ116У	0,97	0,95	-	2,0	11,0	-

Периодичность и объём работ в рамках технического обслуживания регламентируются Положением о системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД» (для снятых с производства локомотивов) [10], конструкторской документацией завода-изготовителя и руководствами по эксплуатации (для выпускаемых в настоящее время серий локомотивов и обслуживаемых в рамках контрактов сервисного обслуживания или контрактов жизненного цикла) [11]. В таблице 3 в качестве примера приведена периодичность ТОиР тепловозов серии 2ТЭ25КМ, являющаяся дифференцированной. Её предельно допустимое отклонение составляет $\pm 10\%$.

Таблица 3

Виды и периодичность работ технического обслуживания и текущих ремонтов тепловоза 2ТЭ25КМ

№	Вид ТОиР	Периодичность
1	Осмотр тепловоза	При смене локомотивных бригад, а также в пути следования
2	Техническое обслуживание ТО, ч	120
3	Техническое обслуживание ТО15, тыс. км	15
4	Текущий ремонт ТР75, тыс. км	75
5	Текущий ремонт ТР300, тыс. км	300
6	Текущий ремонт ТР600, тыс. км	600
7	Средний ремонт СР, тыс. км	1200
8	Капитальный ремонт КР, тыс. км	2400

Сведем отдельные показатели эталонной модели надёжности тепловоза 2ТЭ25КМ в таблицу 4.

Таблица 4

Отдельные показатели эталонной модели надёжности тепловоза 2ТЭ25КМ

Показатель надёжности	Значение
Параметр потока отказов третьего вида, $1/10^6 \text{ км}$, не более	11,0
Срок службы до списания, лет	40
Коэффициент технического использования	0,95
Коэффициент внутренней готовности	0,97

Периодичность ТОиР, тыс. км
(ТО15 – ТР75 – ТР300 – ТР600 – СР – КР)

15 – 75 – 300 – 600 – 1200 – 2400

Эталонные модели широко используются в рамках теории технической диагностики (теории распознавания образов) для проверки фактического состояния тех или иных реальных технических объектов. По степени отклонения реального объекта от эталонной модели делается вывод о деградации объекта и целесообразности дальнейшей эксплуатации.

Составные части эталонной модели надёжности локомотива активно используются в ремонтном комплексе. Например, в идеальном случае периодичность ТОиР должна соответствовать наработке на отказ тех узлов и агрегатов, обслуживание которых предполагается в рамках системы планово-предупредительных ремонтов, т.е. периодичность ТОиР является декларативной моделью наработки на отказ, установленной отраслевыми стандартами и конструкторской документацией. Другой пример: коэффициент готовности отдельных локомотивов должен поддерживаться на установленном договором уровне (эталонном уровне – примечание авторов статьи) в рамках сервисного обслуживания со стороны ООО «ЛокоТех-Сервис», ООО «СТМ-Сервис».

В эксплуатационном процессе также используются эталонные показатели надёжности. Их использует инженерно-технический персонал региональных Дирекции тяги для планирования ТОиР, оценки повреждаемости и деградации парка по территориальным управлениям и железным дорогам в целом, выполняют другие технологические операции.

Реализуются попытки ранжирования парка локомотивов по надёжности. Так, на основе данных АСУ КАС АНТ региональные Дирекции тяги составляют ежемесячные (ежеквартальные, ежегодные) анализы надёжности, в которых указывают обычно от 4 до 6 наименее надёжных локомотивов по парку (по которым наблюдается больше всего отказов технических средств 1-й и 2-й категорий). Составляются диаграммы Парето, по которым выявляются наименее надёжные группы оборудования. Преобладающее количество отказов определяется по принципу «80/20». Пример диаграммы приведен на рисунке 1.

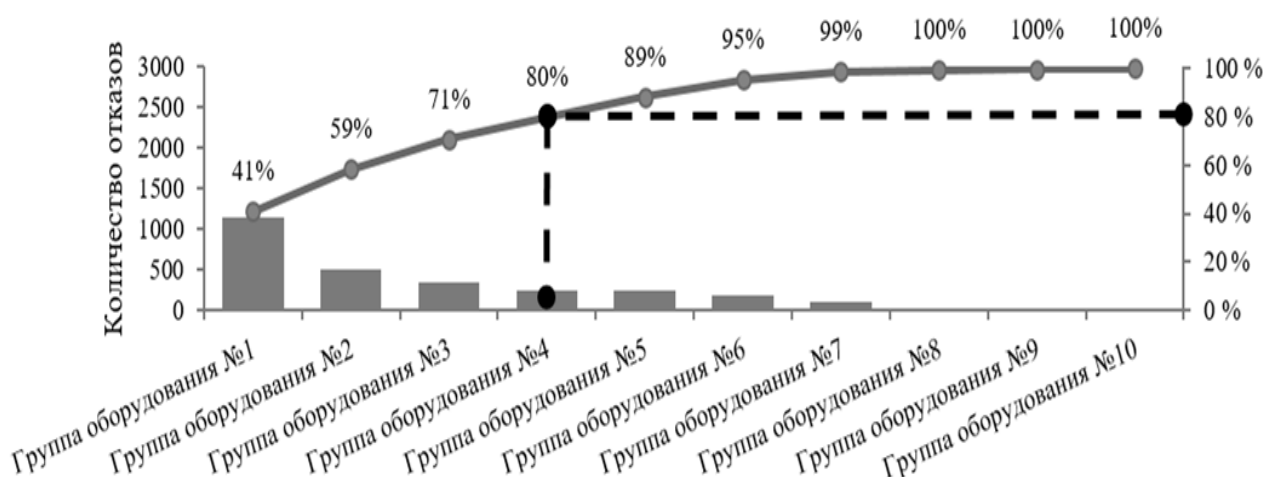


Рис. 1. Пример диаграммы Парето по определению наиболее критичных групп оборудования, суммарная доля отказов которых составляет 80 % от всех отказов

Также выделяют наименее надёжные по числу отказов и внеплановых ремонтов локомотивы в состав группы риска, которые подвергаются углубленному осмотру и контролю во время ТОиР (в соответствии с Порядком работы с локомотивами группы риска, утверждённым распоряжением ОАО «РЖД» от 20.12.2022 г. № 3383/р) и т.д.

Однако показатели надёжности, ранжирование парка по числу отказов не применяются при принятии решения о постановке локомотива под поезд, как указывалось в предыдущей части статьи. В данном процессе для оценки локомотивов до сих пор используется бинарная

модель «исправен» – «неисправен». Таким образом, имеется возможно внедрить эталонную модель надёжности локомотива или её отдельные части в процесс принятия решения о постановке локомотива под поезд.

Надёжность как критерий. Как было указано выше, эталонная модель надёжности локомотива в целом определяется большим количеством показателей (пример – таблица 4). В данном случае показатели надёжности выступают в виде общего выходного параметра, характеризующего техническое состояние всего локомотива и отражающие функциональную взаимосвязь между отдельными и общими параметрами так:

$$u = f(\alpha_1, \dots, \alpha_n, \dots, \alpha_t), \quad (1)$$

где U – общий параметр, характеризующий надёжность локомотива «в целом»;
 $\alpha_1 \div \alpha_t$ – параметры, характеризующие состояние отдельных узлов локомотива и качество процесса эксплуатации и ТОиР [12].

Каким образом возможно учесть все показатели надёжности в совокупности? Один из возможных способов – индексный или факторный метод, когда на основе отдельных показателей или параметров вычисляют общий коэффициент или показатель u (критерий u), функционально связанный с ними, по одной из следующих формул:

- факторный метод

$$Y = k_1 X_1^a + k_2 X_2^b + \dots + k_i X_i^o + \dots + k_n X_n^z + C, \quad (2)$$

где Y – показатель расчёта по итогам факторного анализа;

X_i – факторные параметры;

a, b, o, z – показатели степени для параметров типа X_i ;

C – свободный член уравнения;

k_i – коэффициент эластичности, характеризующий степень влияния каждого из факторных показателей на Y [13];

- индексный метод

$$ИТС = \sum_i (KBU_j \cdot ИТСU_j), \quad (3)$$

где $ИТС$ – индекс технического состояния как результат расчёта по индексному методу;

KBU_j – значение весового коэффициента и индекса технического состояния j -го функционального узла ($j = \overline{1, m}$);

$ИТСU_j$ – значение индекса технического состояния j -го функционального узла [14].

Рассчитанный по формуле (2) или (3) коэффициент технического состояния K_{TC} будет отражать общее техническое состояние локомотива по его показателям надёжности. K_{TC} фактически равен функции полезности U_{ij} в задаче о назначениях; $K_{TC\max} = U_{ij\max}$ будет выступать решением задачи о назначениях; локомотив с наибольшим $K_{TC\max}$ требуется поставить под поезд как наиболее надёжный.

Из всех показателей надёжности для расчёта коэффициента K_{TC} предлагается рассматривать показатели безотказности или комплексные показатели, так как именно они:

- отражают вероятность отказа локомотива в пути следования;
- оценивают общее техническое состояние локомотива.

Приведём в качестве примера по одному показателю надёжности – показатель безотказности и комплексный показатель.

С точки зрения технического состояния локомотива в целом, в качестве комплексного показателя наиболее предпочтительным представляется использовать коэффициент внутренней готовности, зависящий только от пребывания локомотива в работоспособном состоянии и от продолжительности простоев локомотива на неплановых ремонтах:

$$K_{BG} = \frac{t_{PC}}{t_{PC} + t_{OT}}, \quad (4)$$

где t_{PC} – суммарное время пребывания локомотивов в работоспособном состоянии в рассматриваемом периоде эксплуатации, ч;

t_{OT} – суммарное время пребывания локомотивов в неработоспособном состоянии в связи с ремонтами из-за отказов установленных видов в рассматриваемом периоде эксплуатации, ч.

В качестве показателя безотказности рассмотрим параметр потока отказов отдельного локомотива, точечная оценка которого производится по формуле

$$\hat{\omega}_0 = \frac{n}{X_{\Sigma}}, \quad (5)$$

где n – число ОТС на локомотив;

X_{Σ} – линейный пробег рассматриваемого локомотива, млн км [15].

Пример решения задачи о назначениях. Рассчитаем K_{TC} по формуле (2), где в качестве параметров X_i приняты показатели надёжности (K_{BG} , $\hat{\omega}_0$ и др.), коэффициенты k_i определены методом подбора, а показатели степени a, b, o, z приняты равными единице.

Расчёт производился в качестве решения частного случая задачи о назначениях локомотива под поезд, где $N = 1$ поезд, $M = 2 \div 6$ локомотивов, все локомотивы одной серии $P_1 = P_2 = \dots = P_6$, и требуется выбрать наиболее надёжный локомотив под поезд.

В рамках решения задачи о назначениях было рассмотрено 20 случаев отказов локомотива под поездом за 2024 год. Определён K_{TC} для отказавшего локомотива и нескольких локомотивов, которые теоретически было возможно поставить под тот же поезд ранее (локомотивы находились в одном раздельном пункте в одно время незадолго до отказа). Рассматривались отказы технических средств только 1-й категории. Данные по локомотивам обезличены без привязки к конкретным участкам и времени. В соответствии с принятой методикой расчёта K_{TC} , чем он меньше, тем выше надёжность локомотива.

В 80 % рассмотренных случаев отказов было возможно поставить альтернативный локомотив с меньшим K_{TC} под поезд. Как минимум в двух рассмотренных случаях под отказавший локомотив мог быть поставлен менее тяжёлый поезд, а тяжёлый поезд из-под отказавшего локомотива – под более надёжный локомотив.

Пример расчёта и сопоставления K_{TC} разных локомотивов приведены в таблице 5.

Таблица 5

Сравнение коэффициента технического состояния нескольких локомотивов

Случай №1					
№	Локомотив №1 (отказ)	Локомотив №2	Локомотив №3	Локомотив №4	
K_{TC}	5,29	1,13	0,39	1,51	
Вывод: вместо отказавшего локомотива №1 под поезд предпочтительнее было ставить локомотивы №2÷4					
Случай №2					
№	Локомотив №1 (отказ с поездом 6800 т)	Локомотив №2 (поезд 6800 т)	Локомотив №3 (поезд 1600 т)		
K_{TC}	1,99	0,78	0,74		
Вывод: вместо отказавшего локомотива №1 под поезд предпочтительнее было ставить локомотивы №2 или №3, локомотив №1 возможно было поставить под поезд 1600 т					
Случай №3					
№	Локомотив №1 (отказ с поездом 5600 т)	Локомотив №2 (6900 т)	Локомотив №3 (поезд 7000 т)	Локомотив №4 (поезд 4600 т)	Локомотив №5 (поезд 6200 т)
K_{TC}	1,88	1,84	2,81	0,37	1,53
Вывод: вместо отказавшего локомотива №1 под поезд предпочтительнее было ставить локомотив №4 или №5, локомотив №1 возможно было поставить под поезд 4600 т					

Заключение. Представленное в статье сравнение K_{TC} нескольких локомотивов говорит о возможности использования надёжности локомотива как критерия постановки локомотива под поезд вместе с другими существующими условиями, например, такими как соответствие локомотива весовой норме. Критерий надёжности позволяет уйти от стандартной бинарной оценки «исправен» – «неисправен». Оценку надёжности возможно выполнить на основе существующей совокупности требований к показателям надёжности локомотивов из нормативно-технической, конструкторской документации, образующей эталонную модель надёжности. Предлагаемый подход позволяет «интеллектуализировать» постановку локомотива под поезд в рамках совершенствования технологии управления движением.

В качестве дальнейших задач исследования определены следующие:

- анализ статистически значимой выборки отказов локомотивов для подтверждения сходимости предлагаемой модели оценки надёжности;
- уточнение показателей надёжности, используемых для расчёта K_{TC} локомотива, сравнение различных вариантов расчёта для выбора наилучшего;
- уточнение порядка расчёта K_{TC} локомотива, рассмотрение альтернативных вариантов оценки интегрального состояния локомотива по его надёжности.

Список литературы

1. Хижняк, М. А. Интеллектуализация управленческих функций дежурного по станции (ДСП) : автореф. дис. канд. техн. наук : 2.9.4 / М. А. Хижняк. – Самара : АО «ВНИИЖТ», 2021. – 24 с.
2. Единая интеллектуальная система управления и автоматизации производственных процессов на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ). Техническое задание. 82462078.08526.000.ТЗ. – ОАО «РЖД», 2013. – 162 с.
3. Liu, Z.; Zhang, C.; Dong, E.; Wang, R.; Li, S.; Han, Y. Research Progress and Development Trend of Prognostics and Health Management Key Technologies for Equipment

References

1. Khizhnyak, M. A. Intellectualization of management functions of the station duty officer (SDO): author's abstract. dis. cand. tech. sciences: 2.9.4 / M. A. Khizhnyak. - Samara: JSC "VNIIZhT", 2021. - 24 p.
2. Unified intelligent control and automation system for production processes in railway transport (UICAT). Terms of Reference. 82462078.08526.000.TZ. – JSC Russian Railways, 2013. – 162 p.
3. Liu, Z.; Zhang, C.; Dong, E.; Wang, R.; Li, S.; Han, Y. Research Progress and Development Trend of Prognostics and Health Management Key Technologies for Equipment

Diesel Engine. Processes 2023, 11, 1972. <https://doi.org/10.3390/pr11071972>.

4. **Ortiz-Astorquiza, C.; Cordeau J.-F.; Frejinger E.** The Locomotive Assignment Problem with Distributed Power at the Canadian National Railway Company. *Cirrelt-2019-55*. 2019. – 38 p.

5. **Рябых, Н. Г.** Сравнительный анализ алгоритмов решения задачи о прикреплении тяговых ресурсов к поездам / Н. Г. Рябых, В. Г. Матюхин, А. Б. Шабунин // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование – ИСУЖТ-2015 ... , Москва, 18.11.2015. – М.: АО "НИИАС", 2015. – С. 28-30.

6. На пути к безотказности [Электронный ресурс]. ЛокоТех // URL: <https://www.locotech.ru/press-center/publication/5074/#:~:text=Отказы%20технических%20средств%20ведут%20к,1> (дата обращения: 11.11.2025).

7. Технология учёта и контроля пробегов локомотивов, утверждённая распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2015 № 2919р.

8. ГОСТ 31187-2011. Тепловозы магистральные. Общие технические требования. – М.: Стандартиформ, 2012. – 53 л.

9. Методические положения для расчета показателей безотказности и готовности локомотивов по результатам их эксплуатации, утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 11.04.2019 N 704/р.

10. Положение о системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД», утверждённое распоряжением ОАО «РЖД» от 17.01.2005 N 3р (ред. от 05.03.2018).

11. Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ. Руководство по эксплуатации. Часть 3. Инструкция по техническому обслуживанию и текущему ремонту. 2ТЭ25КМ РЭ2. – Брянск: БМЗ, 2015. – С. 16.

12. **Гнеденко, Б. В.** Математические методы в теории надёжности. Основные характеристики надёжности и их статистический анализ / Б. В. Гнеденко,

Diesel Engine. Processes 2023, 11, 1972. <https://doi.org/10.3390/pr11071972>.

4. **Ortiz-Astorquiza, C.; Cordeau J.-F.; Frejinger E.** The Locomotive Assignment Problem with Distributed Power at the Canadian National Railway Company. *Cirrelt-2019-55*. 2019. – 38 p.

5. **Ryabykh, N. G.** Comparative analysis of algorithms for solving the problem of attaching traction resources to trains / N. G. Ryabykh, V. G. Matyukhin, A. B. Shabunin // Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling - ISUZhT-2015 ..., Moscow, 11/18/2015. - М.: JSC "NIIAS", 2015. - P. 28-30.

6. Towards reliability [Electronic resource]. LocoTech // URL: <https://www.locotech.ru/press-center/publication/5074/#:~:text=Отказы%20технических%20средств%20ведут%20к,1> (date of access: 11.11.2025).

7. The technology for recording and monitoring locomotive mileage, approved by the order of JSC Russian Railways dated 14.12.2015 No. 2919r.

8. GOST 31187-2011. Mainline diesel locomotives. General technical requirements. – М.: Standartinform, 2012. – 53 p.

9. Methodological provisions for calculating the reliability and readiness indicators of locomotives based on the results of their operation, approved by the order of JSC Russian Railways dated 11.04.2019 N 704/r.

10. Regulations on the system of technical maintenance and repair of locomotives of JSC Russian Railways, approved by the order of JSC Russian Railways dated 17.01.2005 N 3r (as amended on 05.03.2018).

11. Mainline two-section freight diesel locomotive 2TE25KM. Operation manual. Part 3. Instructions for technical maintenance and routine repairs. 2TE25KM RE2. – Bryansk: BMZ, 2015. – P. 16.

12. **Gnedenko, B. V.** Mathematical methods in reliability theory. Main characteristics of reliability and their statistical analysis / B. V. Gnedenko, Yu. K. Belyaev, A. D. Soloviev //

Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев // М.: Изд-во «Наука», 1965. – 524 с.

13. **Осяев, А. Т.** Обеспечение эксплуатационной надёжности локомотивов на этапах жизненного цикла. Сб. науч. тр. / под ред. А.Т. Осяева, А.Б. Подшивалова. М.: Интекст, 2006. – 159 с.

14. **Богомолова, Ю. И.** Интегральная оценка технического состояния трансформаторов. Ожидания и реальность / Ю. И. Богомолова, В. М. Левин // Борисовские чтения : Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Красноярск, 25–26 октября 2023 года. – Красноярск: СФУ, 2024. – С. 35-41.

15. Методические положения для расчета показателей безотказности и готовности локомотивов по результатам их эксплуатации, утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 11.04.2019 г. N 704/р.

Moscow: Nauka Publishing House, 1965. – 524 p.

13. **Osyayev, A. T.** Ensuring operational reliability of locomotives at stages of the life cycle. Collection of scientific papers / edited by A. T. Osyayev, A. B. Podshivalov. Moscow: Intekst, 2006. – 159 p.

14. Bogomolova, Yu. I. Integral assessment of the technical condition of transformers. Expectations and reality / Yu. I. Bogomolova, V. M. Levin // Borisov readings: Proceedings of the IV All-Russian scientific and technical conference with international participation, Krasnoyarsk, October 25–26, 2023. - Krasnoyarsk: SFU, 2024. - P. 35-41.

15. Methodological provisions for calculating the reliability and readiness indicators of locomotives based on the results of their operation, approved by the order of JSC Russian Railways dated 11.04.2019 No. 704/r.

A. K. Plyaskin, A. A. Potapov

RELIABILITY INDICATORS AS SIGNIFICANT CRITERIONS FOR LOCOMOTIVE ASSIGNMENT TO A TRAIN

Abstract. The article considers a specific case of the assignment problem – the locomotive assignment problem (to a single train). The proposed solution is to take into account locomotive reliability indicators. Currently, the set of requirements for locomotive reliability established by regulatory, technical, and design documentation effectively constitutes a master model of locomotive reliability. That master model is used to improve maintenance and repair and the operation process, but is not applied in process of locomotive assigning to a train. To select a locomotive with the appropriate reliability for a train, it is proposed to calculate the technical condition coefficient K_{TC} using individual reliability indicators. A comparison of technical condition coefficient (K_{TC}) of several locomotives has been carried out. The solution under consideration is a possible way to intellectualize the process of locomotive assigning to a train.

Keywords: reliability indicators, traffic planning & management, locomotive assignment problem, assignment problem, master model, maintenance, intellectualization.

For citation: Plyaskin, A. K. Reliability Indicators as Significant Criterions for Locomotive Assignment to a Train / A. K. Plyaskin, A. A. Potapov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 137–146. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_137.

Сведения об авторах

Пляскин Артем Константинович
Дальневосточный государственный
университет путей сообщения (ДВГУПС),
Ректорат,

Information about the authors

Plyaskin Artem Konstantinovich
Far Eastern State Transport University,
Rectorate,
Candidate of Engineering Science,

Кандидат технических наук, доцент, Associate Professor, Prorector of Learning;
проректор по учебной работе, e-mail: prur@festu.khv.ru
e-mail: prur@festu.khv.ru

Потапов Антон Андреевич
ФГБОУ ВО «Дальневосточный
государственный университет путей
сообщения»,
кафедра «Транспорт железных дорог»,
аспирант,
e-mail: thenorthkambox@mail.ru

Potapov Anton Andreevich
Far Eastern State Transport University,
Chair «Railway Transport»,
Postgraduate Student,
e-mail: thenorthkambox@mail.ru

П. А. Поляков, В. В. Светличный, А. В. Мизюкаев

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УЗЛА ОХЛАЖДЕНИЯ ДИСКОВО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ

Аннотация. Узел охлаждения тормозного диска выполняет роль рассеивания тепловой энергии в окружающую среду. Выполненный анализ источников, посвященных тепловой нагруженности, аккумулируемой на рабочих поверхностях показал увеличение точности прогнозирования температурных полей, напряженно-деформированного состояния и ресурса работы по условиям термической усталости за счет применения тепловых и термоупругих моделей с движущимися источниками тепла. В проанализированных литературных источниках, посвященные конвективному теплообмену от поверхностей вентиляционного аппарата, в основном решается тепловая задача, связанная с потоками воздуха, основные параметры которой изменяются в одной плоскости вентиляционного аппарата, тогда как изменение потоков воздуха в объеме каналов узла охлаждения является не рассматриваемой в процессе исследований. Конструктивные решения, изменяющие форму ребер или сегментов узла охлаждения, увеличивают среднюю скорость потока и теплоотдающую способность от поверхностей ребер, не учитывая режима протекания воздушного потока. На основании проведенного анализа необходимо при построении вентиляционных каналов турбулизовать поток и уменьшать величины слоев воздуха, располагающегося вдоль стенок ребер и нерабочих поверхностей полудисков.

Ключевые слова: тормозной диск, вентиляционный аппарат, вентиляционные каналы, сегменты, турбулизация воздушного потока.

Для цитирования: Поляков, П. А. Пути повышения эффективности работы узла охлаждения дисково-колодочных тормозов / П. А. Поляков, В. В. Светличный, А. В. Мизюкаев // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 147–153. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_147.

Тормозные диски аккумулируют при торможении достаточно большое количество тепла на своих рабочих поверхностях, значительное количество перераспределяется по площади и толщине тормозного диска. Для увеличения конвективного теплообмена тормозные диски выполняются с встроенным узлом охлаждения. Узел охлаждения может представлять собой дополнительное оребрение на нерабочих поверхностях тормозного диска, как в случае полудисков встроенных в колесные пары электропоездов, так и вентиляционные каналы для проходящего воздуха с возможностью конвекции от их стенок (рис. 1).

а)



б)



Рис. 1. Тормозные диски с узлами охлаждения:
оребрение нерабочих поверхностей полудисков (а); вентиляционные каналы,
расположенные между полудисками (б)

В статье [1] разработана несимметричная тепловая модель с движущимися источниками тепла, которая определяла влияние на пространственное распределение температуры в тормозном диске изменение радиального и окружного тепловых потоков, и канавок, расположенных на колодках. В результате было установлено, что геометрия и величины габаритных размеров зоны подвода теплового потока значительно оказывают влияние на изменение температуры поверхности. Разработанная модель прогнозировала удельную область перегрева в течение времени торможения. Результаты исследования показали влияние формы, расположения и различных размеров канавок, выполненных на колодках. В работе [2] на примере разработанной термоупругой модели с движущимися источниками тепла исследуются изменения напряжений и деформаций в тормозных дисках с серийной и предлагаемой геометрией дисков. Проведены расчеты прогнозирования срока усталостного разрушения при эксплуатации в режимах непрерывного торможения для тормозных дисков с серийной геометрией. Оценка напряжений и деформаций в термоупругой модели во времени показывает колебательный характер нарастания, изменяющийся по частоте и амплитуде. В конечном итоге петля гистерезиса напряжений и деформаций демонстрирует сложное движение вперед и назад в период нагрева. Модель показала, что циклические колебания напряжений и деформаций происходят на глубине до 8,5 мм от поверхности. Наиболее опасными составляющими напряжения является окружная и радиальная, тогда как осевая составляющая не представляет опасности для зарождения трещин в тормозных дисках. Режим непрерывного торможения увеличивает напряжения и деформации тормозного диска в два раза, в сравнении со служебным циклическим торможением. В работе [3] создана термомеханическая имитационная модель дискового тормоза. Смоделированная максимальная температура на поверхности диска после 0,66 с торможения составляла 244,3 °C, а по достижении времени торможения $t = 0,72$ с, максимальное напряжение дискового тормоза составило 232,1 МПа. Используя метод Мэнсона-Коффина для расчета термической усталости, был рассчитан ресурс работы тормозного диска исходя из условия термической усталости для служебного и экстренного режимов торможения. Для экстренного режима торможения ресурс работы будет снижен в 856 раз по сравнению с эксплуатацией тормоза при служебном торможении.

Как видно из проведенного анализа литературных источников можно утверждать, что совершенствование методов моделирования процессов аккумулирования энергии на поверхности дисков приводит к более точным расчетам тепловой нагруженности и распределения тепловых потоков в тормозных дисках [4-8].

Исследование [9] показало, что способность к теплообмену у новой конструкции вентиляционного аппарата диска с Y-образными сегментами, увеличилась по сравнению с критериями теплообменных процессов у дисков с другими конструкциями вентиляционных аппаратов дисков на 10 % (рис. 2 и 3). Средняя скорость воздуха при протекании через вентиляционный аппарат увеличилась на 23% в сравнении с остальными конструкциями.

В статье [10] проводилось экспериментальное исследование теплоотдачи от стационарных тормозных дисков, с различными узлами охлаждения: с радиальными каналами, с криволинейными каналами без отверстий и с отверстиями. Показатели теплоотдачи от рабочих поверхностей тормозного диска с вентиляционным аппаратом сравнивались со сплошными дисками. Эксперименты проводились на специально разработанной установке для термического отжима и обеспечили повторяемое и точное измерение температуры и надежный прогноз коэффициентов суммарного, конвективного и радиационного рассеяния тепла. Скорость нагреваемого воздуха, выходящего из стационарного диска, не превышала 1 м/с. Коэффициенты конвективной теплопередачи увеличились с ростом температуры, но их диапазон значений был мал и составил от 3 Вт/(м²К) до 5 Вт/(м²К). Тормозной диск с радиальными каналами обладал самым высоким коэффициентом рассеивания конвективного тепла, а сплошной диск уступал ему примерно на 30%. Коэффициент конвективного рассеивания тепла для дисков с криволинейными каналами

ниже на 20%, чем для дисков с радиальными каналами. Поперечные отверстия незначительно увеличило теплоотдачу от поверхностей диска.

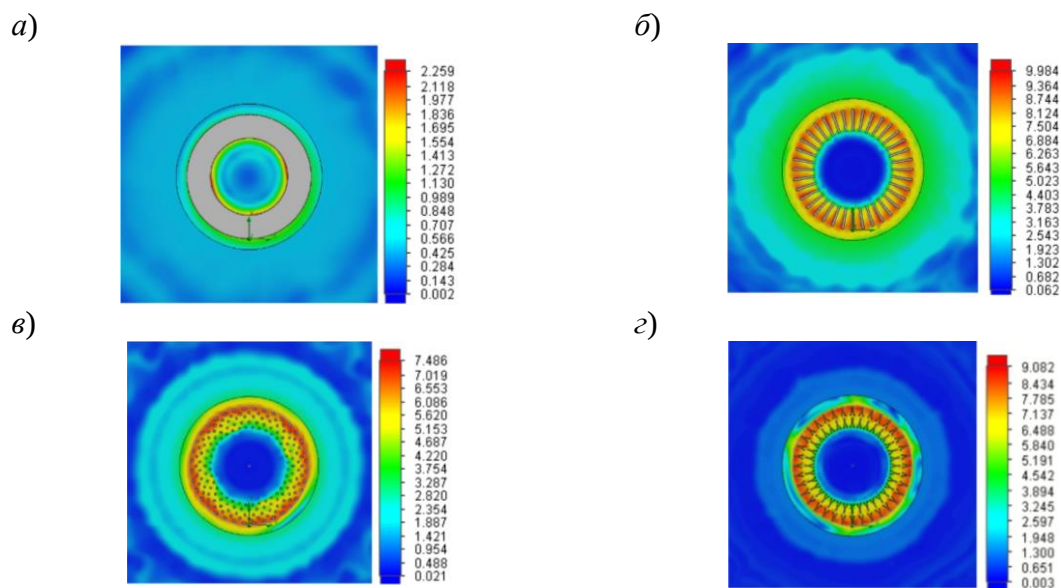


Рис. 2. Изменение скоростей потока воздуха для различных конфигураций вентиляционных аппаратов тормозных дисков [м/с]:
сплошной диск (а), с радиальными стенками (б), с цилиндрическими сегментами (в), с Y-образными сегментами (з)

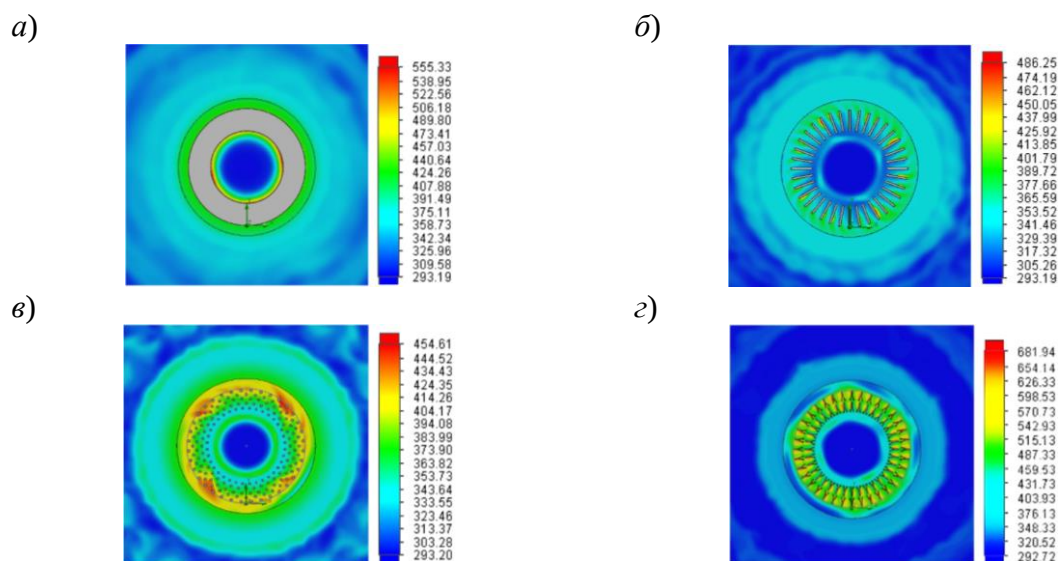


Рис. 3. Изменение температуры воздушного потока в различных конфигурациях дисковых тормозов:
сплошной диск (а), с радиальными стенками (б), с цилиндрическими сегментами (в), с Y-образными сегментами (з)

В исследовании [10] предложена модель оптимизации вентиляционного тормозного механизма легкового автомобиля. Проработаны пути повышения конвективной теплопередачей и ее лучшее распределение внутри вентиляционных каналов за счет использования турбулизаторов с квадратными ребрами (рис. 4).

Целью исследования [11] является повышение теплопередачи вентилируемых тормозных дисков с помощью модифицированных ребер. В результате была предложена новая конструкция ребра с использованием профиля для повышения эффективности откачки воздуха, повышающего скорость потока между ребрами. Сравнение производилось между моделями тормозных дисков с различными оребренными вентиляционными аппаратами. В

закключение исследования авторы отмечают улучшение значений коэффициента теплопередачи на 17-29% для оребренного вентиляционного аппарата с аэродинамическими ребрами и ребрами вторичного профиля.

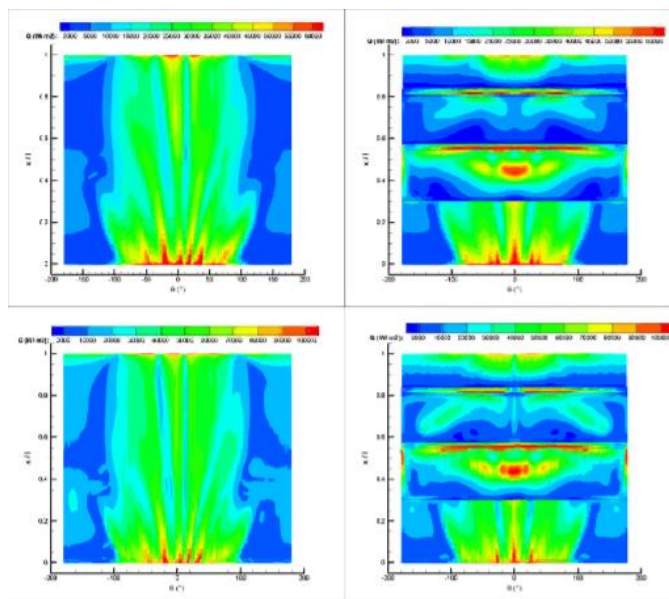


Рис. 4. Тепловой поток на поверхности вентиляционных каналов: оребренный вентиляционный аппарат (слева) и оребренный вентиляционный аппарат с турбулизаторами (справа) при оборотах вращения $n = 8850$ об/мин (вверху) и $n = 1770$ об/мин (внизу)

Подводя итог проводимому литературному анализу можно утверждать, что оценка тепловой нагруженности увеличивает точность прогнозирования теплового и напряженного состояния, тогда как разработка вентиляционных аппаратов базируется на методах оценки плоских CFD-моделях [12]. В качестве предлагаемых усовершенствований вентиляционного аппарата на первый план выступают изменение геометрии сегментов и дополнение турбулизаторов в вентиляционных каналах. В первую очередь необходимо совершенствовать каналы, таким образом, чтобы разделять потоки и искусственно уменьшать прослойку воздуха, расположенную у поверхностей каналов и сегментов, для увеличения скорости протекания вблизи сегментов, что увеличит теплообменные процессы не только от стенок ребер и сегментов, но и от нерабочих поверхностей полудисков. Увеличивая скорость протекания воздушного потока необходимо также стремиться турбулизовать поток для уменьшения пограничных слоев, как фактора препятствующего росту теплообменных процессов и увеличению эффективности работы узла охлаждения тормозного диска.

Список литературы

1. Deressa, K. T., Ambie, D. A. Non-Axisymmetric modelling of moving heat source for spatial and temporal investigation of temperature in railway vehicles disc brake (2022) Urban Rail Transit 8, PP. 198–216. <https://doi.org/10.1007/s40864-022-00176-9>.
2. Deressa, K. T., Ambie, D. A. Non-axisymmetric modeling of a moving heat source for thermal stress and fatigue analysis of railway vehicle disc brakes (2024) Urban Rail Transit 10, PP. 42–64. <https://doi.org/10.1007/s40864-023-00207-z>.

References

1. Deressa, K. T., Ambie, D. A. Non-Axisymmetric modelling of moving heat source for spatial and temporal investigation of temperature in railway vehicles disc brake (2022) Urban Rail Transit 8, PP. 198–216. <https://doi.org/10.1007/s40864-022-00176-9>.
2. Deressa, K. T., Ambie, D. A. Non-axisymmetric modeling of a moving heat source for thermal stress and fatigue analysis of railway vehicle disc brakes (2024) Urban Rail Transit 10, PP. 42–64. <https://doi.org/10.1007/s40864-023-00207-z>.

3. **Chen, C., Yang, Q., Zhang, H., Zhao, X., Gao, C., Gao, Y.** Thermal fatigue life prediction under emergency braking of disc brake based on FEA simulation. (2026) The 9th International Conference on Advances in Construction Machinery and Vehicle Engineering. ICACMVE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. PP. 73–83. https://doi.org/10.1007/978-981-96-5527-4_7.
4. **Яицков, И. А.** Моделирование динамики рычажной передачи тормозной системы в процессе торможения на участке пути, имеющему неровности (на примере пассажирского вагона) / И. А. Яицков, В. В. Косаревский // Вестник Донского государственного технического университета. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 36-41. – DOI 10.23947/1992-5980-2020-20-1-36-41. – EDN XZXASI.
5. **Яицков, И. А.** Эффективность теплоотвода поверхностей тормозного диска тормозной системы подвижного состава при различных режимах работы вентиляционного аппарата / И. А. Яицков, Е. С. Федотов, А. А. Назаретов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1(97). – С. 219-224. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_219. – EDN BKEGWH.
6. **Яицков, И. А.** Методика определения аэродинамических характеристик диффузорных вентиляционных каналов тормозных дисков транспортных средств / И. А. Яицков, Е. С. Федотов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1(89). – С. 257-263. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_257. – EDN RCETKE.
7. Влияние направление воздушного потока воздуха на эффективность работы вентиляционного аппарата тормозного диска / И. А. Яицков, Е. С. Федотов, М. В. Стародуб [и др.] // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 15. – С. 99-103. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-15-99-103. – EDN BJEISP.
8. **Яицков, И. А.** Повышение эффективности торможения локомотивов: специальность 05.22.07 "Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и

3. **Chen, C., Yang, Q., Zhang, H., Zhao, X., Gao, C., Gao, Y.** Thermal fatigue life prediction under emergency braking of disc brake based on FEA simulation. (2026) The 9th International Conference on Advances in Construction Machinery and Vehicle Engineering. ICACMVE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. PP. 73–83. https://doi.org/10.1007/978-981-96-5527-4_7.
4. **Yaitskov, I. A.** Modeling the dynamics of the lever transmission of the brake system during braking on a section of the track with unevenness (using a passenger car as an example) / I. A. Yaitskov, V. V. Kosarevsky // Bulletin of the Don State Technical University. - 2020. - Vol. 20, No. 1. - P. 36-41. - DOI 10.23947/1992-5980-2020-20-1-36-41. - EDN XZXASI.
5. **Yaitskov, I. A.** Efficiency of heat removal of brake disc surfaces of the rolling stock braking system under various operating modes of the ventilation apparatus / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov, A. A. Nazaretov // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2025. - No. 1 (97). - P. 219-224. - DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_219. - EDN BKEGWH.
6. **Yaitskov, I. A.** Methodology for determining the aerodynamic characteristics of diffuser ventilation ducts of brake discs of vehicles / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2023. - No. 1 (89). - P. 257-263. - DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_257. - EDN RCETKE.
7. The influence of air flow direction on the efficiency of the brake disc ventilation apparatus / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov, M. V. Starodub [et al.] // Transport, mining and construction engineering: science and production. - 2022. - No. 15. - P. 99-103. - DOI 10.26160/2658-3305-2022-15-99-103. - EDN BJEISP.
8. **Yaitskov, I. A.** Increasing the efficiency of locomotive braking: specialty 05.22.07 "Rolling stock of railways, train traction and electrification": dissertation for the degree of

электрификация": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Яицков Иван Анатольевич. – Ростов-на-Дону, 2003. – 233 с. – EDN NMKGOJ.

9. **Haddar, M. B. J., Ghorbel, A., Djemal, F. [et al.]** Heat transfer and flow analysis through a new brake disc design: a CFD approach (2025) *Int J Interact Des Manuf* 19, PP. 4215–4224. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-02027-2>.

10. **Topouris, S., Stamenković D., Olphe-Galliard, M., Popović, V., Tirovic, M.** Heat dissipation from stationary passenger car brake discs (2020) *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 66, PP. 15-28. DOI:10.5545/sv-jme.2019.6002.

11. **Panelli, M.** Thermal fluid dynamics analysis of vented brake disc rotor with ribs turbulators. Conference: International conference: Thermal and Environmental Issues in Energy Systems, ASME-UIT-ATI, Sorrento, Italy. 2010. 7p. DOI: 10.13140/2.1.3525.7122.

12. **Nejat, A., Aslani, M., Mirzakhilili, E., Najian, R. Asl.** Heat Transfer Enhancement in Ventilated Brake Disk Using Double Airfoil Vanes. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2011. vol. 3(4). USA. 10p. DOI: 10.1115/1.4004931.

candidate of technical sciences / Yaitskov Ivan Anatolyevich. - Rostov-on-Don, 2003. - 233 p. - EDN NMKGOJ.

9. **Haddar, M. B. J., Ghorbel, A., Djemal, F. [et al.]** Heat transfer and flow analysis through a new brake disc design: a CFD approach (2025) *Int J Interact Des Manuf* 19, PP. 4215–4224. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-02027-2>.

10. **Topouris, S., Stamenković D., Olphe-Galliard, M., Popović, V., Tirovic, M.** Heat dissipation from stationary passenger car brake discs (2020) *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 66, PP. 15-28. DOI:10.5545/sv-jme.2019.6002.

11. **Panelli, M.** Thermal fluid dynamics analysis of vented brake disc rotor with ribs turbulators. Conference: International conference: Thermal and Environmental Issues in Energy Systems, ASME-UIT-ATI, Sorrento, Italy. 2010. 7p. DOI: 10.13140/2.1.3525.7122.

12. **Nejat, A., Aslani, M., Mirzakhilili, E., Najian, R. Asl.** Heat Transfer Enhancement in Ventilated Brake Disk Using Double Airfoil Vanes. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2011. vol. 3(4). USA. 10p. DOI: 10.1115/1.4004931.

P. A. Polyakov, V. V. Svetlichny, A. V. Mizyukaev

WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF THE DISC BRAKE COOLING UNIT

Abstract. The cooling unit of the brake disc performs the role of dissipating heat energy into the environment. The analysis of sources devoted to thermal stress accumulated on work surfaces showed an increase in the accuracy of forecasting temperature fields, stress-strain state and service life under thermal fatigue conditions due to the use of thermal and thermoelastic models with moving heat sources. In the analyzed literature sources devoted to convective heat exchange from the surfaces of the ventilation apparatus, the thermal problem associated with air flows is mainly solved, the main parameters of which change in one plane of the ventilation apparatus, while the change in air flows in the volume of the channels of the cooling unit is not considered in the research process. Constructive solutions that change the shape of the fins or segments of the cooling unit increase the average flow rate and heat transfer capacity from the fin surfaces, without taking into account the flow mode of the air flow. Based on the analysis carried out, it is necessary to turbulate the flow and reduce the size of the air layers located along the walls of the ribs and the non-working surfaces of the half-discs when constructing ventilation ducts.

Keywords: brake disc, ventilation unit, ventilation ducts, segments, turbulence of the air flow.

For citation: Polyakov, P. A. Ways to Improve the Efficiency of the Disc Brake Cooling Unit / P. A. Polyakov, V. V. Svetlichny, A.V. Mizyukaev // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – №. 4. – P. 147–153. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_147.

Сведения об авторах**Поляков Павел Александрович**

Набережночелнинский институт Казанского
федерального университета,
кафедра «Механики и конструирования»,
заведующий кафедрой,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Светличный Владислав Владимирович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»,
аспирант,
e-mail: mr.vladvladvlad14@mail.ru

Мизюкаев Анатолий Вячеславович

Набережночелнинский институт Казанского
федерального университета,
кафедра «Автомобилей»,
аспирант,
e-mail: mizyukaev2000@gmail.com

Information about the authors**Polyakov Pavel Alexandrovich**

Naberezhnye Chelny Institute of Kazan
Federal University,
Chair «Mechanics and Engineering»,
Head of the Chair,
Doctor of Technical Sciences, Associate
Professor,
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Svetlichny Vladislav Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life Safety»,
Postgraduate Student,
e-mail: mr.vladvladvlad14@mail.ru

Mizyukaev Anatoly Vyacheslavovich

Naberezhnye Chelny Institute of Kazan
Federal University,
Chair «Automobiles»,
Postgraduate Student,
e-mail: mizyukaev2000@gmail.com

Ю.Ю. Романенко, Ю.И. Булыгин, Т.А. Финоченко

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛЕЙ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА

Аннотация. В статье рассматриваются особенности и сравнительные характеристики современных моделей радиационного теплопереноса, применяемых в физической теплотехнике. Актуальность исследования обусловлена сложностью математического описания процессов переноса энергии электромагнитными волнами. Целью исследования является анализ и систематизация существующих моделей радиационного теплообмена, выявление их преимуществ и ограничений для практического применения. Анализ пяти основных моделей: дискретной модели переноса излучения, радиационной модели, модели Росселанда, поверхностно-поверхностной модели и модели дискретных ординат. Для каждой модели рассмотрены: математический аппарат; область применения; преимущества и ограничения; особенности реализации. Систематизация знаний о моделях радиационного теплопереноса, что позволяет выбрать оптимальный метод расчета для конкретных инженерных задач.

Ключевые слова: радиационного теплообмена; модели теплообмена; тепловой поток

Для цитирования: Романенко, Ю. Ю. Особенности моделей радиационного теплопереноса / Ю. Ю. Романенко, Ю. И. Булыгин, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 154–161. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_154.

Введение.

Разработка адекватных моделей радиационного теплообмена представляет собой одну из наиболее сложных задач современной физической теплотехники. Это обусловлено фундаментальным отличием механизма переноса тепла излучением от теплопроводности и конвекции: энергия переносится электромагнитными волнами, не требуя материальной среды. Следовательно, математическое описание процесса неизбежно интегрирует законы термодинамики, оптики и квантовой механики, что рождает уникальные особенности применяемых моделей.

Краеугольным камнем любой модели является понятие спектральной интенсивности излучения, зависящей от координат, направления, частоты и времени. На этой основе выстраивается базовое уравнение переноса – интегро-дифференциальное уравнение, учитывающее ослабление интенсивности за счет поглощения и рассеяния, а также её усиление благодаря собственному излучению среды и приходящему рассеянному излучению со всех направлений. Непосредственное решение этого уравнения, точное даже в стационарном случае, сопряжено с колоссальными вычислительными затратами для реальных геометрий и широкого спектрального диапазона.

Основная часть.

Модельный расчет радиационной теплопередачи выполняется в тех случаях, когда величина лучистого теплового потока превышает значения тепловых потоков, обусловленных процессами конвекции или теплопроводности. Этот механизм наиболее характерен для условий высоких температур и подчиняется закону Стефана-Больцмана, согласно которому интенсивность излучения пропорциональна разнице четвертых степеней абсолютных температур излучающих поверхностей [1 - 3]. В силу этого ключевой особенностью моделирования становится поиск разумных упрощений, балансирующих между точностью и трудоемкостью. Первый уровень – это модели, основанные на радиационных свойствах системы. Здесь выделяется модель серого тела, пренебрегающая зависимостью свойств от длины волны, что резко упрощает расчеты, но часто ведет к значительным погрешностям,

особенно при больших градиентах температур. Более продвинутые спектральные модели, разбивающие диапазон на полосы или использующие узкополосные приближения, увеличивают точность ценой роста объема исходных данных и времени счета.

Обобщенная модель радиационной теплопередачи для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды в положении и направлении описывается следующим уравнением:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega', \quad (1)$$

где $\vec{r}$ – вектор положения; $\vec{s}$ – вектор направления; $\vec{s}'$ – вектор направления рассеяния; s – длина пути; a – коэффициент абсорбции газа; n – показатель преломления среды; σ_s – коэффициент рассеяния; σ – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$); I – интенсивность излучения; T – локальная температура газа; Φ – фазовая функция; Ω' – телесный угол; $(a + \sigma_s)$ – оптическая толщина или непрозрачность среды [4-6].

Рисунок 1 иллюстрирует процесс радиационного теплообмена в модели радиационной теплопередачи.

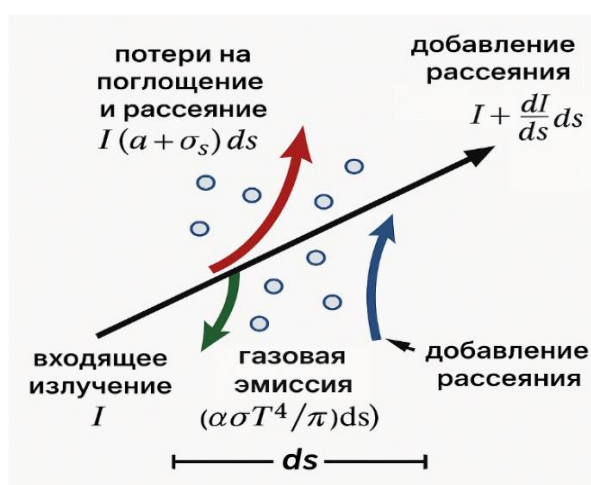


Рис. 1. Радиационный теплоперенос

Моделирование процессов нагрева поверхностей от радиации за счет искусственных источников тепла может производиться с помощью различных моделей излучения, которые рассмотрим более подробно [1, 5]:

1. *Дискретная модель переноса излучения (DTRM)* [4, 6]. Она обладает тремя ключевыми преимуществами: простотой реализации, гибкостью точности благодаря варьированию числа лучей и универсальностью применения в различных диапазонах оптической толщины среды. Однако при применении DTRM в программе ANSYS Fluent важно учитывать ряд ограничений:

- все поверхности предполагаются идеально диффузионными, равномерно распределяющими отражение падающего излучения;
- рассеяние излучения не принимается во внимание моделью;
- рассчитываются лишь спектры серого излучения;
- увеличение числа расчетных лучей значительно повышает требования к вычислительным ресурсам;
- модель несовместима с нестандартными сеточными интерфейсами, подвижными сетками и параллельными вычислениями.

При расчете распространения излучения в рамках DTRM используется следующее основное уравнение:

$$\frac{dI_s}{ds} = -\kappa I_s + \kappa n^2 I_b + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I'_s \Phi(s', s) d\Omega', \quad (2)$$

где I_s – интенсивность излучения в направлении s , s – путь луча, k – коэффициент поглощения, n – показатель преломления среды, I_b – интенсивность черного тела, σ_s – коэффициент рассеяния, $\Phi(s', s)$ – фазовая функция рассеяния, $d\Omega'$ – элементарный телесный угол.

Пространство разбивается на множество лучей, каждый из которых соответствует определённому направлению распространения излучения. Эти лучи проходят через всю расчётную область, пересекая контрольные объёмы (ячейки сетки). Интенсивность излучения интегрируется вдоль каждого луча, учитывая поглощение, рассеяние и излучение среды. Это позволяет рассчитать изменение интенсивности излучения по мере прохождения луча через среду. Основное уравнение переноса излучения решается для каждого луча, что позволяет учесть все виды взаимодействия излучения с окружающей средой. После того как интенсивность излучения рассчитана для всех лучей, проводится усреднение по всем направлениям, чтобы получить общий тепловой поток в каждой точке расчётной области.

2. *Радиационная модель P-1* [7]. Имеет ряд преимуществ перед моделью DTRM. Уравнение переноса излучения (1) преобразуется в уравнение диффузии, решение которого требует минимальных затрат процессорного времени. Дополнительно данная модель включает учет эффекта рассеяния излучения. Она подходит для анализа сложной геометрической формы объектов с использованием криволинейных координат и особенно полезна при исследовании сред с большой оптической плотностью, таких как процессы горения.

Интенсивность излучения разлагается в ряд по сферическим гармоникам, где r – радиус-вектор положения, a – единичный вектор направления. В модели P-1 учитываются только первые две гармоники, соответствующие нулевой и первой степеням косинуса угла между направлением излучения и осью координат. Угловое распределение интенсивности излучения аппроксимируется линейной функцией, что приводит к упрощённой форме уравнения переноса излучения. Полученная система дифференциальных уравнений решается численно, что позволяет найти распределение температуры и плотности излучения в среде.

Основное уравнение переноса излучения в модели P-1 записывается следующим образом:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{3k} \nabla G \right) = k(G - 4\pi B), \quad (3)$$

где G – полный поток излучения, k – коэффициент поглощения, B – интенсивность черного тела.

Применение модели излучения P-1 сопровождается определенными ограничениями:

- предполагается идеальная диффузность всех поверхностей;
- несмотря на возможность учета не серых спектров, необходимо отдельно вводить коэффициенты поглощения и спектральные характеристики стенок для каждой полосы спектра;
- в средах с низкой оптической плотностью возникают заметные погрешности при анализе сложных геометрических форм;
- локальные источники тепла могут приводить к завышению предсказанных значений радиационных потоков.

3. *Модель излучения Росселанда*. Выгодно выделяется среди ранее рассмотренных моделей двумя основными особенностями. Первая — высокая эффективность и низкая нагрузка на ресурсы процессора, поскольку в отличие от модели P-1 отсутствует необходимость решать дополнительную транспортную задачу для падающего излучения. Вторая особенность заключается в том, что применение данной модели целесообразно исключительно в средах с высоким значением оптической толщины ($\tau > 3$).

Основной принцип модели Росселанда заключается в том, чтобы упростить решение уравнения переноса излучения путём замены сложного спектрального коэффициента поглощения средним значением, называемым средней непрозрачностью Росселанда. Это

позволяет рассматривать перенос излучения как аналог диффузионного процесса, что существенно упрощает математическое описание проблемы.

Средняя непрозрачность Росселанда определяется как взвешенное среднее обратных величин спектральной непрозрачности по всему спектру частот:

$$\kappa_R = \frac{\int_0^\infty \frac{1}{\kappa_\nu} \frac{\partial B_\nu}{\partial T} d\nu}{\int_0^\infty \frac{\partial B_\nu}{\partial T} d\nu}, \quad (4)$$

где κ_ν – спектральная непрозрачность на частоте ν , B_ν – функция Планка, описывающая спектр излучения абсолютно черного тела, T – температура среды.

Следует помнить, что использование модели Росселанда ограничено приложениями с решателями, основанными на давлении, и она не совместима с решателями, использующими плотность [6].

4. *Поверхностно-поверхностная модель излучения (S2S)* [4]. Данная модель отлично зарекомендовала себя в ситуациях, когда перенос излучения осуществляется непосредственно между поверхностями без участия промежуточной среды. Примеры включают системы космического теплообмена, солнечные коллекторы, инфракрасные отопительные приборы и автомобильные радиаторы. Здесь традиционные методы расчета часто оказываются неэффективными. По сравнению с методом дискретных ординат (DTRM), метод S2S обеспечивает значительное сокращение времени одной итерации, хотя общие затраты ресурсов процессора остаются высокими. Однако, если гранями поверхностей являются полигоны многогранных элементов сетки, время расчетов возрастает.

Основные ограничения поверхностно-поверхностной модели S2S:

- все поверхности принимаются абсолютно диффузными, равномерно отражающими падающую энергию;
- применяется только для расчета монохроматического («серого») излучения;
- метод не поддерживает обработку височных узлов и адаптивных изменений сетки вблизи излучающих границ;
- большое количество отдельных граней увеличивает нагрузку на процессор, однако объединение поверхностей в группы (кластеры) позволяет снизить этот недостаток.

Тепловой поток от элемента i к элементу j выражается следующей формулой:

$$Q_{ij} = A_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4), \quad (5)$$

где A_i – площадь элемента i , F_{ij} – фактор формы от элемента i к элементу j , σ – постоянная Стефана-Больцмана, T_i и T_j – температуры элементов i и j соответственно.

Вся поверхность, участвующая в обмене излучением, делится на небольшие элементы (ячейки). Каждый элемент рассматривается как источник и приёмник излучения. Для каждого элемента рассчитывается фактор формы, который определяет долю излучения, приходящую от данного элемента к другим элементам. Факторы формы зависят от геометрии системы и взаимного расположения элементов. Для каждого элемента учитываются свойства поверхности, такие как степень черноты, отражательная способность и температура. На основе рассчитанных факторов формы и свойств поверхности составляется система уравнений, которая решается для нахождения теплового баланса каждого элемента.

5. *Модель дискретных ординат (DO)* [8]. Решение ищется для каждой выбранной ординаты, что трансформирует исходное уравнение в систему связанных дифференциальных уравнений. Главная особенность данной модели – появление так называемого «эффекта лучевания», артефакта, связанного с дискретизацией направлений, который может исказить результат в областях с резкими изменениями интенсивности. Пригодна для широкого спектра задач, охватывая различные уровни оптической толщины среды — от чисто поверхностного излучения до глубокого проникновения излучения в условиях горения. Данная модель также эффективно описывает процессы передачи излучения сквозь частично прозрачные стенки. Ее основным преимуществом является умеренное потребление оперативной памяти.

Пространство направлений излучения разбивается на несколько дискретных углов (ординатов), каждое из которых соответствует определённому направлению распространения излучения. Таким образом, интенсивность излучения рассматривается как сумма вкладов от каждого из этих направлений. Интенсивность излучения интегрируется вдоль каждого луча, соответствующего выбранному углу, учитывая поглощение, рассеяние и излучение среды. Это позволяет рассчитать изменение интенсивности излучения по мере прохождения луча через среду. Основное уравнение переноса излучения решается для каждого выбранного угла, что позволяет учесть все виды взаимодействия излучения с окружающей средой. После того как интенсивность излучения рассчитана для всех углов, проводится усреднение по всем направлениям, чтобы получить общий тепловой поток в каждой точке расчётной области.

Основное уравнение переноса излучения, которое решается в рамках модели DO, выглядит следующим образом:

$$s_m \cdot \nabla I_m(r) + (\kappa + \sigma_s) I_m(r) = \kappa I_b(r) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \sum_{n=1}^N w_n \Phi(s_m, s_n) I_n(r), \quad (6)$$

где $I_m(r)$ – интенсивность излучения в направлении s_m в точке r , s_m – направление излучения, соответствующее m -му ординату, κ – коэффициент поглощения, σ_s – коэффициент рассеяния, $I_b(r)$ – интенсивность черного тела, $\Phi(s_m, s_n)$ – фазовая функция рассеяния, w_n – весовой коэффициент для n -го ордината, N – общее количество ординатов.

Модель может применяться как для расчетов серого, так и несерого излучения, используя концепцию серых полос. Точное решение задачи с мелкоступенчатым угловым распределением может потребовать значительных вычислительных усилий.

В ANSYS Fluent реализация моделирования несерого излучения основана на учете аспекта спектрального поглощения a_λ , который изменяется скачкообразно в различных спектральных диапазонах и остается практически постоянным внутри каждого диапазона. Например, стекло демонстрирует именно такое полосатое поведение. Несерое излучение в ANSYS Fluent поддерживается всеми методами, предназначенными для серого излучения. Это означает, что одновременно можно учитывать такие явления, как рассеяние, анизотропия, взаимодействие с полупрозрачными материалами и влияние частиц. Данный подход также допускает детализацию определения спектральной излучательной способности стенок, принимая её постоянной в пределах каждой спектральной полосы.

Отдельного внимания заслуживают модели, предназначенные для учета радиации в сочетании с другими видами теплообмена. В задачах горения, высокотемпературной газодинамики или при проектировании космических аппаратов излучающая способность частиц сажи, трехатомных газов или плазмы становится определяющей. Здесь модели радиационного переноса должны быть тесно связаны с моделями химической кинетики, турбулентности и течения реагирующей среды, требуя консистентного определения оптических свойств и температуры на каждом шаге итерационного процесса.

Заключение.

Поскольку в настоящей работе исследования проводятся как в теплый период года, так и в холодный, было принято решение использовать единую модель для описания поведения воздушной среды в кабине железнодорожного крана. Вследствие того, что при расчетах в охлаждающем микроклимате отсутствует радиационная составляющая, то и в нагревающем, теплоступления от солнечных лучей моделировались как процессы тепломассопереноса посредством задания температуры окружающей среды и температуры стенок кабины. Также причиной использования именно такой модели можно считать низкий процент остекления кабины, что говорит о том, что основная нагрузка на кабину возникает через непрозрачные конструкции.

Таким образом, выбор конкретной модели радиационного теплопереноса всегда представляет собой компромисс. Он определяется спектральной сложностью среды, оптической толщиной (от оптически тонких атмосфер до практически непрозрачных тел),

геометрией задачи, доступными вычислительными ресурсами и, в конечном счете, требуемой точностью инженерного расчета. Развитие вычислительной техники и алгоритмов постепенно смещает этот баланс в сторону более точных и универсальных, но и более ресурсоемких моделей, открывая новые возможности для проектирования высокотемпературных систем будущего.

Список литературы

1. Верификация расчета процесса теплообмена в программном комплексе ANSYS CFX / Ахмедзянов Д.А., Кишалов А.Е. // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2009. – №. 2. – С. 226-232.
2. **Месхи, Б.Ч.** Математическое и экспериментальное моделирование процессов распространения 127 оксидов углерода и избытков теплоты в газозооушной среде помещения / Месхи Б.Ч., Маслов Е.И., Соловьёв А.Н., Булыгин Ю.И., Корончик Д.А. // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11. — № 6 (57). — С.862–874.
3. **Hanel B.** Beitrag zur Berechnung von Freistrahlenmiterhohten Anfangsturbulenz / Luft- und Kaltetechnik. — 1997. —Vol.4. — P. 193–197.
4. **Блох, А.Г.** Основы теплообмена излучением / Под ред. д-ра техн. наук проф. А.М. Гурвича. — Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. — 331 с.
5. **Бородина, Е.С.** Расчет систем кондиционирования воздуха с применением теплообменных аппаратов / Бородина, Е.С., Кочетов О.С. // Наука и современность. –2014. – № 27. – С. 147-152.
6. Bulygin Y.I., Koronchik D.A., Legkonogikh A.N., Zharkova M.G., Azimova N.N. Physical and theoretical models of heat pollution applied to cramped conditions welding taking into account the different types of heat // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. –Article 012015.
7. **Киселев, Н.В.** Моделирование процессов теплоаассопереноса на основе технологии ANSYS / Н.В. Киселев, В.М. Каравайков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 9-10. – С. 20-26.1950.

References

1. Verifikatsiya rascheta protsessa teploobmena v programmnom komplekse ANSYS CFX / Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.Ye. // Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. – 2009. – №. 2. – S. 226-232.
2. Meskhi, B.Ch. Mathematical and experimental modeling of the processes of propagation of 127 carbon oxides and excess heat in the gas-air environment of a room / Meskhi B.Ch., Maslov E.I., Soloviev A.N., Bulygin Yu.I., Koronchik D.A. // Bulletin of the Don State Technical University. - 2011. - Vol. 11. - No. 6 (57). - P.862-874.
3. **Hanel B.** Beitrag zur Berechnung von Freistrahlenmiterhohten Anfangsturbulenz / Luft- und Kaltetechnik. — 1997. —Vol.4. — P. 193–197.
4. **Bloch, A.G.** Fundamentals of Radiative Heat Transfer / Ed. by Doctor of Technical Sciences, Prof. A.M. Gurvich. — Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1962. — 331 p.
5. **Borodina, E.S.** Calculation of air conditioning systems using heat exchangers / Borodina, E.S., Kochetov O.S. // Science and Modernity. - 2014. - No. 27. - P. 147-152.
6. Bulygin Y.I., Koronchik D.A., Legkonogikh A.N., Zharkova M.G., Azimova N.N. Physical and theoretical models of heat pollution applied to cramped conditions welding taking into account the different types of heat // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. –Article 012015
7. **Kiselev, N.V.** Modeling of heat and mass transfer processes based on ANSYS technology / N.V. Kiselev, V.M. Karavaikov // News of higher educational institutions. Problems of power engineering. - 2012. - No. 9-10. - P. 20-26.1950.

8. **Лепеш, Г.В.** Моделирование процесса тепломассопереноса в программной среде Ansys/Fluent при дифференцированном отоплении подземного перехода / Г.В. Лепеш, Т.В. Потемкина, Г.А. Спроге // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2015. – № 4(34). – С. 41-48.

8. **Lepesh, G.V.** Modeling of heat and mass transfer process in the Ansys/Fluent software environment for differentiated heating of an underground passage / G.V. Lepesh, T.V. Potemkina, G.A. Sproge // Technical and technological problems of service.– 2015. – No. 4(34). – P. 41-48.

Yu. Yu. Romanenko, Yu. I. Bulygin, T. A. Finochenko

FEATURES OF RADIATION HEAT TRANSFER MODELS

Abstract. This article examines the features and comparative characteristics of modern radiative heat transfer models used in physical heat engineering. The relevance of this study is due to the complexity of the mathematical description of energy transfer processes by electromagnetic waves. The aim of this study is to analyze and systematize existing radiative heat transfer models, identifying their advantages and limitations for practical application. Five main models are analyzed: the discrete radiative transfer model, the radiation model, the Rosseland model, the surface-to-surface model, and the discrete ordinate model. For each model, the following are considered: mathematical apparatus; scope of application; advantages and limitations; and implementation features. This article systematizes knowledge of radiative heat transfer models, enabling the selection of the optimal calculation method for specific engineering problems.

Keywords: radiative heat transfer; heat transfer models; heat flux

For citation: Romanenko, Yu. Yu. Features of radiative heat transfer models / Yu.Yu. Romanenko, Yu.I. Bulygin, T.A. Finochenko // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – No. 4. – P. 154–161. - DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_154.

Сведения об авторах

Романенко Юлия Юрьевна

Ростовский государственный университет путей сообщения,
кафедры «Безопасность жизнедеятельности»,
аспирант
e-mail: romanenko.iulya@yandex.ru

Бulygin Юрий Игоревич

Ростовский государственный университет путей сообщения,
профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности»,
доктор технических наук, профессор
e-mail: bulyur_rostov@mail.ru

Финоченко Татьяна Анатольевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),

Information about the authors

Romanenko Yulia Yuryevna

Rostov State Transport University,
Chair «Life safety»,
Postgraduate Student
e-mail: romanenko.iulya@yandex.ru

Bulygin Yuri Igorevich

Rostov State Transport University,
Professor, Department of Life Safety,
Doctor of Engineering Sciences, Professor
e-mail: bulyur_rostov@mail.ru

Finochenko Tatiana Anatolyevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life Safety»,

кафедра «Безопасность жизнедеятельности»,
заведующий кафедрой,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: fta09@bk.ru

Head of the Department, Candidate of
Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: fta09@bk.ru

А. С. Тычков, Д. А. Чемоданов, А. А. Строганова

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. Статья посвящена анализу применения информационных технологий, используемых для оптимизации технического содержания электроподвижного состава, рассмотрены особенности такого инструмента как цифровые двойники.

Ключевые слова: электроподвижной состав, информационные технологии, техническое содержание, цифровой двойник, диагностика.

Для цитирования: Тычков, А. С. Основные направления применения цифровых инструментов для технического содержания электроподвижного состава / А. С. Тычков, Д. А. Чемоданов, А. А. Строганова// Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 162–166. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_162.

Надежность техники и безопасность железнодорожных перевозок напрямую зависят в первую очередь от исправности электроподвижного состава (ЭПС). Эксплуатация ЭПС сопровождается постепенным ухудшением его технического состояния вследствие естественного износа систем (особенно элементов механического и электрического оборудования). Кроме того, резко ухудшают состояние внезапные выходы элементов оборудования из работоспособного состояния, последствием которого могут стать аварийные ситуации, ведущие к нарушению графика движения и сходам подвижного состава с рельсового пути. Чтобы предотвратить возникновение подобных ситуаций необходимо своевременно и эффективно проводить диагностику всех критически важных элементов с целью выявления предотказного состояния. Реализация указанных негативных сценариев возможна по причине наличия ошибок при проектировании конструкции, некачественного проведения ремонтно-восстановительных работ (несоблюдение технологии), нарушения регламента эксплуатации.

Применяемая в настоящее время планово-предупредительная система обслуживания и ремонта ЭПС является недостаточно выгодной и ограниченной. Заход подвижного состава на техническое обслуживание и текущий ремонт осуществляется для оборудования еще не исчерпавшего свой ресурс, соответственно вызывая неоправданно высокие и излишние затраты на проведение ремонтно-восстановительных операций. Еще одним негативным моментом является невозможность эффективного контроля внезапных отказов и сбоев в работе ЭПС. Последствиями этого являются простои подвижного состава, сбои в графике движения поездов. Весь локомотивный комплекс несет убытки из-за недостаточного контроля критических узлов. Также одним из недостатков планово-предупредительной системы ремонта и обслуживания выступает чрезмерно частая организация контроля агрегатов, не выработавших свой ресурс, из-за чего производится разборка и ремонт до истечения срока службы, что приводит к дополнительным финансовым потерям. Изменение существующей системы требует применения передовых цифровых инструментов, способных оптимизировать принципы организации ремонтного цикла в депо.

Современные цифровые технологии оказывают трансформирующее воздействие на все сферы деятельности человека. Они дают возможность управлять значительными объемами информации (хранить/обрабатывать/передавать). Оперативный анализ информации позволяет формализовать комплексные операции и повысить скорость выполнения задач. Применение алгоритмов искусственного интеллекта позволяет оптимизировать рабочий процесс персонала и минимизировать вероятность возникновения ошибок, вызванных человеческим фактором.

Информационные технологии могут применяться и для мониторинга текущего состояния подвижного состава в реальном времени с целью выявления возможных отказов и

их своевременного устранения. Инструменты, включающие интернет вещей, обработку больших данных и предиктивную аналитику, формируют базис для перехода с системы планово-предупредительной к ремонту по фактическому состоянию [1, 2].

Чтобы обеспечить эффективность контроля и диагностирования при выполнении ремонтно-восстановительных работ предлагается двухуровневая система технического диагностирования и текущего ремонта электронных устройств электроподвижного состава с применением автоматизированных средств технической диагностики. Данное техническое решение определено необходимостью более точного выявления состояния оборудования, эффективному поиску возможных дефектов, что существенно повышает качество и уровень самого диагностического процесса, увеличивая тем самым показатели эксплуатационной готовности ЭПС. Ключевой проблемой существующих методов контроля и диагностики остаются довольно значительные временные затраты на классификацию состояния оборудования с отысканием дефектов. Поэтому необходимо модернизировать и улучшать, базирующиеся на известных методах оценки технического состояния уже эксплуатируемые системы диагностирования с целью минимизации длительности протекания процесса.

Рассмотрим такое средство мониторинга оборудования ЭПС, как систему контроля и диагностики электрооборудования «Доктор-030М», которая на протяжении нескольких десятилетий зарекомендовала себя как эффективный и надежный инструмент (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид системы контроля и диагностики «Доктор-030М»

Основной функционал указанной системы диагностики заключается в следующем:

- возможность контроля параметров электрооборудования с визуализацией результатов на встроенном дисплее;
- выявление неисправностей оборудования ЭПС;
- настройка параметров геометрической нейтрали в электродвигателях по данным контроля;
- проведение оценки временных параметров срабатывания и отпускания электрической коммутационной аппаратуры;
- возможность формирования и передачи по итогам диагностики отчёта для последующей работы на автоматизированном рабочем месте.

Семейство систем (приборов) контроля и диагностики «Доктор-030» позволяет по результатам проведенных исследований выполнять прогнозную оценку состояния элементов электрооборудования с возможным определением остаточного технического ресурса по ряду узлов. В процессе проведения диагностирования происходит накопление информации по каждой единице электроподвижного состава для конкретного оборудования, т.е. с привязкой к нему. Поэтому, используя потенциал такой информационной технологии, как работа с большими данными, появляется возможность выстраивания прогноза для конкретного узла подвижного состава.

Современные системы оценки технического состояния представляют собой программно-аппаратные комплексы, базирующиеся на цифровых технологиях с применением искусственного интеллекта. Одним из наиболее перспективных направлений является технология цифровых двойников [3, 4]. Данная технология получила широкое распространение в мире, потому что она является весьма доступной и адаптивной для решения

множества задач. Суть данного направления заключается в создании цифровой компьютерной модели рассматриваемого объекта (оборудования ЭПС).

Благодаря цифровым двойникам, появляется возможность анализа вариативности развития функционирования оборудования, с последующим прогнозом на основе полученной информации. Предлагается рассмотреть применение технологии цифровых двойников для проведения оценки технического состояния оборудования электроподвижного состава (рис. 2).



Рис. 2. Структурные элементы цифрового двойника

Процесс формирования цифрового двойника проходит в несколько этапов:

1. Разрабатывается CAD-модель, которую снабжают всей необходимой информацией;
2. В CAE-системах выполняется виртуальное тестирование модели с имитацией физических условий и возможных воздействий при помощи моделирования;
3. САМ-системы преобразуют модель в формат, необходимый для последующего реального производства;
4. проводится сбор и анализ данных о поведении готового объекта в процессе реальной эксплуатации с целью корректировки цифровой модели [5].

Остановимся подробнее на самом важном этапе – создании модели. Процесс проектирования виртуального прототипа сопровождается наполнением модели данными, необходимыми для осуществления следующих этапов. Использование средств инженерного анализа позволяет создать массив различных вариативных ситуаций, которые имитируют реальные процессы и позволяют отследить возможный отклик системы на внешние и внутренние воздействия. Рассматриваемый массив должен отражать каждый фактор, появление которого возможно при реальной эксплуатации объекта и способно повлиять на состояние, а также на функциональность единицы подвижного состава. Далее создается объект с параметрами, заданными в цифровом виде. Благодаря наличию системы хранения баз данных, цифровые двойники способны накапливать поступающую информацию.

Во время виртуальных испытаний оценивается качество каждого цифрового варианта изделия. Наилучший вариант при помощи автоматизированного производства превращается в реальный объект, пригодный для дальнейшей эксплуатации. В процессе эксплуатации информация с реальных объектов считывается и передается на цифровой двойник, где она хранится и при необходимости служит для корректировки цифрового двойника при возникновении отклонений во время проведения реальных испытаний на участке эксплуатации. Чтобы отследить результаты проведения испытаний, их заносят в специальный цифровой паспорт для дальнейшей корректировки в случае обнаружения недостатков существующей модели.

Целесообразно интегрировать диагностические модели ключевых узлов в цифровые двойники на этапе проектирования. Для первичного накопления информации предлагается использовать существующие системы диагностики, такие как «Доктор» и аналогичные, с обязательным дополнением массивом данных от микропроцессорной системы контроля и

диагностики (МПСУиД). Совместное использование данных систем позволяет при создании цифровых двойников закладывать основу для применения методов диагностики на ранних стадиях проектирования, а также при обновлении цифровой модели (рис.3).



Рис. 3. Принципы реализации прескриптивной аналитики

Указанная последовательность действий позволит увеличить характеристики, отвечающие за уровень надёжности объекта. Основным преимуществом здесь является возможность на ранних этапах протестировать различные варианты контроля технического состояния для конкретного оборудования и подобрать наиболее сбалансированный тип оценки технического состояния по критериям технологической эффективности и экономических затрат. Таким образом, планово-предупредительная система ремонта и обслуживания должны быть модернизирована при помощи применения передовых цифровых решений с целью усовершенствования оценки технического состояния ЭПС. Применение цифровых технологий способствует сокращению издержек при проведении диагностических и контрольных операций.

Список литературы

1. **Рыжова, Е. Л.** Применение информационных технологий в системах диагностирования оборудования электроподвижного состава – методы, примеры их реализации, перспективы развития // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 38-60. EDN CCTDNX.
2. Информационные технологии и системы диагностирования при эксплуатации и обслуживании электроподвижного состава : конспект лекций / И. М. Пышный. – Екатеринбург : УрГУПС, 2016. – 65 с.
3. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения : ГОСТ Р 57700.37-2021 : нац. стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 16 сентября 2021 г. N 979-ст : введен впервые : дата введения 2022-01-01. (Компьютерные модели и моделирование) // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ.: <https://docs.cntd.ru/document/1200180928> (дата обращения: 11.11.2025).
4. **Гембух, Л.** Цифровые двойники: Учебное пособие [Электронный ресурс] / Л. Гембух, В. М. Дмитриев, А. Е.

References

1. **Ryzhova, E. L.** Application of information technologies in diagnostic systems for electric rolling stock equipment - methods, examples of their implementation, development prospects // Intelligent Electrical Engineering. 2025. No. 3. P. 38-60. EDN CCTDNX.
2. Information technologies and diagnostic systems in the operation and maintenance of electric rolling stock: lecture notes / I. M. Pyshny. - Ekaterinburg: Ural State University of Railways, 2016. - 65 p.
3. Computer models and modeling. Digital twins of products. General provisions: GOST R 57700.37-2021: national standard of the Russian Federation: approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated September 16, 2021 N 979-st: introduced for the first time: date of introduction 2022-01-01. (Computer models and modeling) // Code: electronic fund of legal and regulatory-technical information: <https://docs.cntd.ru/document/1200180928> (date of access: 11.11.2025).
4. **Gembukh, L.** Digital Twins: A Tutorial [Electronic Resource] / L. Gembukh, V. M. Dmitriev, A. E. Sakhabutdinov. - Tomsk:

Сахабутдинов. – Томск: ТУСУР, 2024. – 88 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/11055> (дата обращения: 11.11.2025).

5. Будаев А. А., Третьяков Е. А. Моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник» // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. – Т. 22. – Вып. 1. – С. 92–101. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-92-101.

TUSUR, 2024. - 88 p. - Access mode: <https://edu.tusur.ru/publications/11055> (accessed: 11.11.2025).

5. Budaev A. A., Tretyakov E. A. Modeling of the electrical part of a freight electric locomotive based on the "Digital Twin" technology // Bulletin of the St. Petersburg State Transport University. - St. Petersburg: PGUPS, 2025. - Vol. 22. - Issue. 1. - Pp. 92–101. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-92-101.

A. S. Tychkov, D. A. Chemodanov, A. A. Stroganova

THE MAIN DIRECTIONS OF APPLICATION OF DIGITAL TOOLS FOR THE TECHNICAL MAINTENANCE OF ELECTRIC ROLLING STOCK

Abstract. The article is devoted to the analysis of the application of information technologies used to optimize the technical content of electric rolling stock, the features of such a tool as digital twins are considered.

Keywords: electric rolling stock, information technology, technical content, digital twin, diagnostics.

For citation: Tychkov, A. S. The Main Directions of Application of Digital Tools for Technical Maintenance of Electric Rolling Stock / A. S. Tychkov, D. A. Suitcase, A. A. Stroganova // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 162–166. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_162.

Сведения об авторах

Тычков Александр Сергеевич

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: a.tychkov@samgups.ru

Чемоданов Даниил Алексеевич

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС),
аспирант,
e-mail: d.chemodanov@samgups.ru

Строганова Августа Александровна

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС),
студент,
e-mail: avgusta.stroganova@yandex.ru

Information about the authors

Tychkov Alexander Sergeevich

Volga State Transport University (VSTU),
Chair «Traction Rolling Stock»,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: a.tychkov@samgups.ru

Chemodanov Daniil Alexeyevich

Volga State Transport University (VSTU),
Postgraduate Student,
e-mail: d.chemodanov@samgups.ru

Stroganova Avgusta Aleksandrovna

Volga State Transport University (VSTU),
Student,
e-mail: avgusta.stroganova@yandex.ru

Р. А. Шахназарян, А. В. Муратов

АНАЛИЗ МИРОВОЙ И РОССИЙСКОЙ ПРАКТИК ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Аннотация. В статье проведен анализ мирового и отечественного опыта применения альтернативных видов топлива на железнодорожном транспорте. Рассмотрены технико-экономические аспекты использования сжиженного природного газа и биотоплива. Особое внимание уделено российским разработкам: газотурбовозам серии ГТ1h и тепловозам ТЭМ19. На основе сравнительного анализа определены перспективные направления развития для ОАО «РЖД».

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, альтернативные виды топлива, сжиженный природный газ (СПГ), газотурбовоз ГТ1h, тепловоз ТЭМ19, экологическая безопасность, технико-экономический анализ, водородные топливные элементы, биодизель для тепловозов, инфраструктура СПГ.

Для цитирования: Шахназарян, Р. А. Анализ мировой и Российской практик использования альтернативных видов топлива на железнодорожном транспорте/ Р. А. Шахназарян, А. В. Муратов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 167–171. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_167.

Введение: Современные вызовы, стоящие перед глобальной транспортной отраслью, – декарбонизация, волатильность цен на нефть и укрепление энергетического суверенитета – формируют объективную необходимость в диверсификации топливно-энергетического баланса. Железнодорожный транспорт, являясь ключевым элементом логистических систем, не остается в стороне от этих тенденций. Несмотря на лидирующие позиции России по уровню электрификации магистралей, автономный тяговый подвижной состав (маневровые и магистральные тепловозы) продолжает оставаться значимым потребителем дизельного топлива, что создает существенные экономические и экологические риски [5].

Целью настоящего исследования является проведение сравнительного анализа реализованных проектов по использованию альтернативных видов топлива на железнодорожном транспорте в мире и в Российской Федерации. В задачи работы входит оценка фактической экономической эффективности, экологических результатов и идентификация барьеров, с которыми столкнулись операторы, для формирования взвешенных рекомендаций по масштабированию успешных решений в условиях ОАО «РЖД».

Мировой опыт: от пилотных проектов к коммерческой эксплуатации. Анализ международной практики позволяет выделить несколько устоявшихся трендов, где переход на альтернативные энергоносители вышел за рамки экспериментов. СПГ: лидер внедрения в грузовых перевозках. Наиболее впечатляющие результаты демонстрируют Северная Америка и Китай. Железнодорожный перевозчик Florida East Coast Railway (FECR) реализовал полный перевод своего парка на природный газ, используя мобильные криогенные танк-контейнеры, что позволило обеспечить запас хода до 900 миль. Canadian National Railway с 2012 года применяет технологию высокого прямого впрыска (HPDI), замещая до 95% дизельного топлива в магистральных перевозках. Ключевым успехом стала стандартизация топливных систем на базе ISO-контейнеров, снижающая капитальные затраты [1].

Биотопливо: европейский системный подход. Европейский Союз стимулирует использование биотоплива через законодательные инициативы, устанавливая целевые показатели его доли в транспортном секторе. Это привело к созданию строгих стандартов качества (EN 14214) и реализации таких проектов, как испытания биодизеля на сети Chiltern Railways (Великобритания). Практика выявила технические нюансы: необходимость

модернизации топливных фильтров, замены уплотнителей и рост удельного расхода на 5-13% из-за меньшей теплотворной способности [3].

Водород и аккумуляторы: нишевые решения. Германия активно развивает водородную мобильность, эксплуатируя поезда Coradia iLint с запасом хода до 1000 км. Несмотря на нулевые выбросы, высокая стоимость всей цепочки - от производства «зеленого» водорода до создания заправочной инфраструктуры – ограничивает широкое применение. Аккумуляторные электровозы находят свою нишу в маневровой работе и на участках с частичной электрификацией, где их преимущества - нулевые выбросы и низкий шум – максимально востребованы [2]. Сравнительный анализ эффективности технологий на основе фактических данных.

Для объективной оценки был проведен сравнительный анализ ключевых технологий по ряду критериев, основанный на данных реальной эксплуатации.

Таблица

Сравнительные характеристики альтернативных видов топлива

Параметр оценки	СПГ	Биодизель (B20)	Водород
Снижение выбросов CO ₂	20-30%	10-15%	100%
Динамика стоимости топлива	-50%	+15%	+300%
Требования к модернизации ПС	Полная	Частичная	Полная
Уровень развития инфраструктуры	Средний	Высокий	Низкий

Российская практика: фокус на СПГ и достигнутые результаты. Отечественный вектор развития альтернативной энергетики на рельсах сконцентрирован на использовании сжиженного природного газа, что обусловлено ресурсными преимуществами страны и возможностью быстрого получения экономического эффекта [4,6]. На Свердловской железной дороге успешно эксплуатируются газотурбовозы ГТ1h-001 и ГТ1h-002, а также маневровый тепловоз ТЭМ19 [6,7]. Накопленная статистика за период с 2013 по 2018 год демонстрирует убедительные результаты: Газотурбовозы перевезли свыше 370 миллионов тонно-километров грузов. Экономия затрат на топливо для газотурбовозов достигла 40%, для маневрового тепловоза ТЭМ19 – 26%. Расчеты по модели жизненного цикла для ГТ1h-002 показали совокупную экономию в 19,4% по сравнению с дизельными аналогами.

Инфраструктурное обеспечение включает создание специализированных вагонов-цистерн модели 15-5106 для перевозки СПГ и строительство заправочных комплексов на базе ГРС-4 в Екатеринбурге и КСПГ «Канюсята» в Пермском крае производительностью 3-5 тонн СПГ в час. В рамках стратегии развития предусмотрено увеличение парка до 25 газотурбовозов и 52 газотепловозов, а также строительство 15-20 новых заправочных станций для достижения 30% доли природного газа в потреблении автономных локомотивов к 2030 году. Несмотря на успехи, существуют проблемы, замедляющие широкое внедрение:

1. Высокие капитальные затраты. Строительство одной криогенной заправочной станции оценивается в 1-3 млн долл., стоимость вагона-цистерны – 0,5-1 млн долл.
2. Ценовая конкуренция. Биотопливо в России (~21,6 тыс. руб./т) остается неконкурентоспособным по сравнению с дизельным топливом (~12-15 тыс. руб./т).
3. Нормативное регулирование. Требуется адаптация нормативной базы и разработка новых стандартов безопасности для газомоторной и водородной техники.

Перспективы связаны с развитием модульных и стандартизированных решений для инфраструктуры СПГ, а также с государственной поддержкой пилотных проектов в области водорода и биотоплива второго поколения.

Несмотря на успехи, массовому внедрению альтернативных видов топлива препятствуют системные барьеры, требующие комплексного решения [1,5]. Анализ современных вызовов позволяет выделить три ключевые группы проблем.

Технико-экономические барьеры остаются наиболее существенными. Как показывают расчеты, капитальные затраты на переоборудование одного магистрального локомотива под СПГ составляют 15-25% от его первоначальной стоимости, а срок окупаемости проекта варьируется от 3 до 7 лет в зависимости от интенсивности эксплуатации [4]. Для водородных технологий ключевой проблемой является низкая объемная энергоемкость водорода, что требует либо его хранения при сверхвысоком давлении (до 700 бар), либо использования сложных криогенных систем, что в совокупности увеличивает массу и стоимость подвижного состава [2]. Особую сложность представляет обеспечение цикловой долговечности топливных элементов, которая в настоящее время не превышает 10-15 тысяч часов, что значительно меньше требуемого срока службы локомотивов. Инфраструктурный разрыв между развитием парка газомоторных локомотивов и заправочной сетью создает «эффект бутылочного горлышка». Строительство одной стационарной криогенной заправочной станции для СПГ требует инвестиций в размере 1-3 млн долларов США, что экономически оправдано только на грузонапряженных направлениях [1]. Для водородной инфраструктуры ситуация еще сложнее – создание сети заправочных станций требует капитальных вложений в 3-5 раз выше, чем для СПГ. Перспективным решением является развитие модульных заправочных комплексов и использование вагонов-заправщиков модели 15-5106, что позволяет обеспечить гибкость и снизить первоначальные капиталовложения.

Нормативно-правовые барьеры включают в себя необходимость адаптации существующих и разработки новых стандартов безопасности, особенно для водородных технологий и криогенного оборудования. Требуется четкое регламентирование процедур заправки, технического обслуживания и ремонта газомоторного подвижного состава, а также подготовка квалифицированного персонала. Особую актуальность приобретает разработка межотраслевых стандартов, учитывающих особенности взаимодействия железнодорожного транспорта с предприятиями газовой и химической промышленности.

Перспективы развития альтернативной энергетики на железнодорожном транспорте связаны с реализацией дифференцированного подхода, учитывающего специфику перевозок и региональные особенности. Для магистральных грузовых перевозок наиболее эффективно использование СПГ, в то время как для маневровой работы в экологически чувствительных районах перспективны аккумуляторные и водородные решения. Развитие биотоплива второго поколения и синтетических топлив (Power-to-X) позволит создать углеродно-нейтральную альтернативу без кардинальной переделки существующего парка [3].

В средне- и долгосрочной перспективе ожидается формирование гибридных энергетических систем, комбинирующих преимущества различных технологий. Например, сочетание СПГ-установок с аккумуляторными батареями позволяет достичь экономии топлива до 30% за счет рекуперации энергии торможения и оптимизации рабочих режимов двигателя. Для пассажирских перевозок в пригородном сообщении перспективными представляются водородно-аккумуляторные гибриды, способные работать как на электрифицированных, так и на неэлектрифицированных участках. Реализация указанных перспектив требует coordinated действий со стороны государства, научно-исследовательских организаций и бизнеса. Ключевыми направлениями сотрудничества должны стать: разработка отечественных стандартов и технических регламентов, создание пилотных полигонов для испытаний новых технологий, а также формирование системы мер государственной поддержки, включая налоговые льготы и субсидирование части капитальных затрат.

Заключение

Проведенный анализ мировой и отечественной практики подтверждает, что перевод железнодорожного транспорта на альтернативные виды топлива является не умозрительным трендом, а действенным инструментом повышения экономической эффективности и экологической устойчивости. Мировой и российский опыт однозначно указывает на сжиженный природный газ как на наиболее подготовленную для масштабирования технологию для грузовых перевозок. Достигнутые ОАО «РЖД» результаты – значительная

экономию топливных затрат и снижение выбросов при эксплуатации газотурбовозов ГТ1h и тепловозов ТЭМ19 – создают прочную основу для реализации стратегических планов по диверсификации топливного парка. Дальнейшее развитие требует комплексного подхода, сочетающего расширение парка газомоторных локомотивов, целенаправленное развитие заправочной инфраструктуры и адаптацию нормативно-правовой базы, что в совокупности укрепит позиции железнодорожного транспорта как наиболее конкурентоспособного и экологичного вида наземных перевозок.

Список литературы

1. Проблемы и перспективы эксплуатации газотепловозов на Куйбышевской железной дороге - филиале ОАО "РЖД" / Д. Я. Носырев, А. В. Муратов, С. А. Петухов, Л. С. Курманова // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – № 5(47). – С. 20-23. – EDN THKZWV.
2. Влияние насыщения дизельного топлива метаном на эксплуатационные показатели тепловозных дизелей / Д. Я. Носырев, А. В. Муратов, Л. С. Курманова, С. А. Петухов // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 6(60). – С. 25-28. – EDN XIQYPN.
3. **Кавтарадзе, Р. З.** Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород / Р. З. Кавтарадзе. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2011. – 240 с. – ISBN 978-5-7038-3482-4. – EDN ZCKZYN.
4. **Молинари, М.** Перспективы применения КПП и СПГ на железнодорожном транспорте / М. Молинари, Я. Хардер // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2018. – № 4(44). – С. 13-16. – EDN YNJWOD.
5. Некоторые аспекты применения газомоторного топлива на дизелях тепловозов / Е. Е. Коссов, В. В. Асабин, А. Г. Силюта [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2020. – Т. 79, № 5. – С. 301-309. – DOI 10.21780/2223-9731-2020-79-5-301-309. – EDN KLRBFK.
6. **Кондратенко, С. Е.** Сжиженный природный газ как альтернатива дизельному топливу на железнодорожном транспорте / С. Е. Кондратенко // Газовая

References

1. Problems and Prospects of Gas-Diesel Locomotives Operation on the Kuibyshev Railway, a Branch of Russian Railways / D. Ya. Nosyrev, A. V. Muratov, S. A. Petukhov, L. S. Kurmanova // Volga Region Transport Bulletin. – 2014. – No. 5(47). – Pp. 20-23. – EDN THKZWV.
2. The Impact of Methane Saturation in Diesel Fuel on the Performance of Diesel Locomotive Engines / D. Ya. Nosyrev, A. V. Muratov, L. S. Kurmanova, S. A. Petukhov // Volga Region Transport Bulletin. - 2016. - No. 6 (60). - P. 25-28. - EDN XIQYPN.
3. **Kavtaradze, R. Z.** Thermophysical processes in diesel engines converted to natural gas and hydrogen / R. Z. Kavtaradze. - Moscow: Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 2011. - 240 p. - ISBN 978-5-7038-3482-4. - EDN ZCKZYN.
4. **Molinari, M.** Prospects for the use of CNG and LNG in rail transport / M. Molinari, J. Harder // Bulletin of the Institute for Natural Monopolies: Railway Engineering. - 2018. - No. 4 (44). - P. 13-16. - EDN YNJWOD.
5. Some aspects of the use of gas motor fuel on diesel locomotives / E. E. Kossov, V. V. Asabin, A. G. Silyuta [et al.] // Bulletin of the Research Institute of Railway Transport. - 2020. - Vol. 79, No. 5. - P. 301-309. - DOI 10.21780/2223-9731-2020-79-5-301-309. - EDN KLRBFK.
6. **Kondratenko, S. E.** Liquefied natural gas as an alternative to diesel fuel in rail transport / S. E. Kondratenko // Gas industry. - 2023. - Special issue No. 1. - P. 24-28.

промышленность. – 2023. – Спецвыпуск №
1. – С. 24-28.

R. A. Shahnazaryan, A. V. Muratov

ANALYSIS OF WORLD AND RUSSIAN PRACTICES OF USING ALTERNATIVE FUELS IN RAIL TRANSPORT

Abstract. The article analyzes the global and domestic experience of using alternative fuels in railway transport. The technical and economic aspects of using liquefied natural gas and biofuels are considered. Special attention is paid to Russian developments: GT1h gas-turbine locomotives and TEM19 diesel locomotives. Based on a comparative analysis, promising development areas have been identified for Russian Railways.

Keywords: railway transport, alternative fuels, liquefied natural gas (LNG), GT1h gas-turbine locomotive, TEM19 diesel locomotive, environmental safety, technical and economic analysis, hydrogen fuel cells, biodiesel for diesel locomotives, LNG infrastructure.

For citation: Shahnazaryan, R. A. Analysis of Global and Russian Practices of Using Alternative Fuels in Railway Transport / R. A. Shahnazaryan, A. V. Muratov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 167–171. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_167.

Сведения об авторах

Шахназарян Роман Ашотович

Приволжский государственный университет
путей сообщения (ПривГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
аспирант,
e-mail: romain.shakhnazaryan@yabdex.ru

Муратов Алексей Владимирович

Приволжский государственный университет
путей сообщения (ПривГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
и. о. заведующего кафедрой,
кандидат технических наук, доцент
e-mail: muratov@samgups.ru

Information about the authors

Shakhnazaryan Roman Ashotovich

Volga State Transport University (VSTU),
Chair «Traction Rolling Stock»,
Postgraduate Student,
e-mail: romain.shakhnazaryan@yabdex.ru

Muratov Alexey Vladimirovich

Volga State Transport University (VSTU),
Chair «Traction Rolling Stock»,
Head of the Chair,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: muratov@samgups.ru

М. А. Шрайбер, В. Н. Иванов, Д. А. Ягудин

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. Обоснована методология и разработан алгоритм моделирования многослойной изоляции тяговых электродвигателей (ТЭД), который является простым, но многообещающим инструментом, позволяющим применять стратегии моделирования зоны сцепления слоев при инженерном анализе проблем возникновения и роста трещин, используя возможности метода конечных элементов. Результаты моделирования распространения усталостного повреждения в режимах нормальных и касательных напряжений, а также в смешанном режиме нагружения показывают, что закон накопления усталостных повреждений различается для распространения расслоения в разных режимах из-за отличий в механизме развития. Следует отметить, что разработка эффективной модели накопления усталостных повреждений требует большого объема экспериментальных данных, в которых в настоящее время ощущается острый дефицит.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, изоляция, термомеханические напряжения, старение изоляции, усталостные повреждения, трещинообразование

Для цитирования: Шрайбер, М. А. Конечнo-элементная модель старения изоляции тяговых электродвигателей локомотивов / М. А. Шрайбер, В. Н. Иванов, Д. А. Ягудин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 172–178. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_172.

Моделирование развития трещины происходит по узлам, поскольку на каждом этапе моделирования рассматривается только одна пара узлов. В результате определение скорости высвобождения энергии деформации осуществляется исключительно для конкретной пары узлов, что способствует упрощению анализа экспериментальных данных. С другой стороны, идентификация пары узлов в вершине трещины требует применения сложных алгоритмов, отслеживающих распространение фронта трещины. Это приводит к снижению вычислительной эффективности моделей.

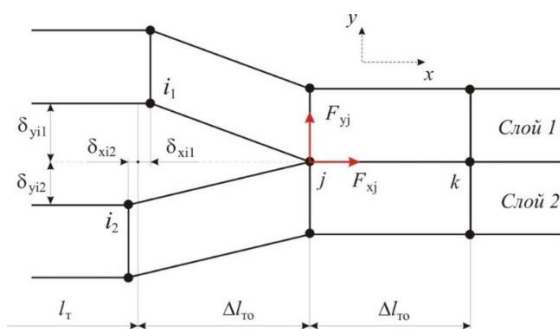


Рис. 1. Эскиз применения метода 2D четырехузловых элементах

В моделях распространения усталостного повреждения изоляции ТЭД с помощью теории линейной упругой механики разрушения в дополнение к принятым учитываются следующие допущения [1-5]:

1. Узловые точки верхней и нижней граней на потенциальных путях трещин имеют одинаковые координаты, и для этих пар узлов заранее определена формулировка связующего контакта;

2. Скорость высвобождения энергии деформации G_d на фронте трещины, вычисляется численными методами.

На рисунке 1 показано применение метода расчета для двухмерных четырехузловых элементов. Узел i разделен на два узла i_1 и i_2 из-за образования трещины. Стрелки изображают силы F_{xj} и F_{yj} , действующие в соответствующем узле.

Предполагается, что после роста трещины от узла j до узла k , состояние смещения за вершиной новой трещины, то есть узел k , приблизительно идентично состоянию смещения за вершиной старой трещины, то есть узлу j , перед расширением трещины, которое означает, что смещения узлов j_1 и j_2 после роста трещины будут равны смещениям узлов i_1 и i_2 .

Компоненты нагружения нормальными напряжениями для скорости высвобождения энергии деформации $G_{дн}$ могут быть рассчитаны как:

$$G_{дн} = -\frac{1}{2\Delta l_{то}} F_{yj} (\delta_{yi1} - \delta_{yi2})^2, \quad (1)$$

где δ_{yi1} и δ_{yi2} – компоненты смещения узлов i_1 и i_2 по оси y , m ;

$\Delta l_{то}$ – расстояние между узлами i и j , m .

Компоненты нагружения касательными напряжениями для скорости высвобождения энергии деформации и $G_{дк}$ могут быть рассчитаны как:

$$G_{дк} = -\frac{1}{2\Delta l_{то}} F_{xj} (\delta_{xi1} - \delta_{xi2})^2, \quad (2)$$

где δ_{xi1} и δ_{xi2} – компоненты смещения узлов i_1 и i_2 по оси x , m .

Вычисления выполняются поэтапно, а уравнения квазистатического равновесия решаются неявным образом путем обращения к итерации Ньютона-Рафсона. По мере продвижения трещины сетка у ее вершины непрерывно смещается, чтобы все время быть в центре текущей вершины трещины. После каждой перестройки сетки смещения, напряжения, пластические деформации и эффективные пластические деформации переносятся со старой сетки на новую.

Очевидно, что вблизи зоны сцепления слоев изоляции размер ячейки должен составлять малую часть размера этой зоны. Затем сетка может постепенно укрупняться от вершины трещины. Оптимальную градацию сетки можно вывести из стандартных оценок ошибки интерполяции. В частности, оптимальный размер сетки стремится к нулю по мере приближения к вершине трещины. Градация размера до расстояний порядка толщины зоны сцепления, ниже которых размер элемента остается постоянным и составляет часть размера этой зоны.

Сетки строятся автоматически, сначала путем объединения всех ребер, определяющих границу области анализа, включая склоны трещины, с требуемой узловой плотностью. Геометрия этих краев постоянно обновляется, чтобы отслеживать продвижение трещины. Внутренние сетки строятся путем вставки узлов в гексагональную решетку с заданной локальной плотностью узлов.

Предложенная численная модель основана на предположении, что между слоями существуют несовершенные богатые смолой межфазные слои, внутри которых развиваются механизмы расслоения. Основная идея состоит в том, чтобы ввести критерий разрушения в конечно-элементный анализ, чтобы определить, где и когда начинается расслоение и как оно распространяется. Этот же критерий, конечно, можно применять для моделирования потенциального роста существующих начальных трещин при определенных условиях

нагружения и, следовательно, для оценки остаточной жесткости и характеристик изоляции тяговых электродвигателей.

Текущее напряженное состояние вычисляется с использованием модели зоны сцепления слоев изоляции ТЭД. Затем применяются критерии отказа, чтобы определить, произошел ли отказ, используя напряженное состояние из предлагаемой модели. Если отказ произошел, свойства изоляции ТЭД соответственно деградируют в соответствии с моделью повреждений. Если отказа нет, то обновленные переменные сохраняются для следующего приращения и выводятся обратно в код конечного элемента. Алгоритм полной модели повреждения и разрушения изоляции ТЭД показан на рисунке 2.

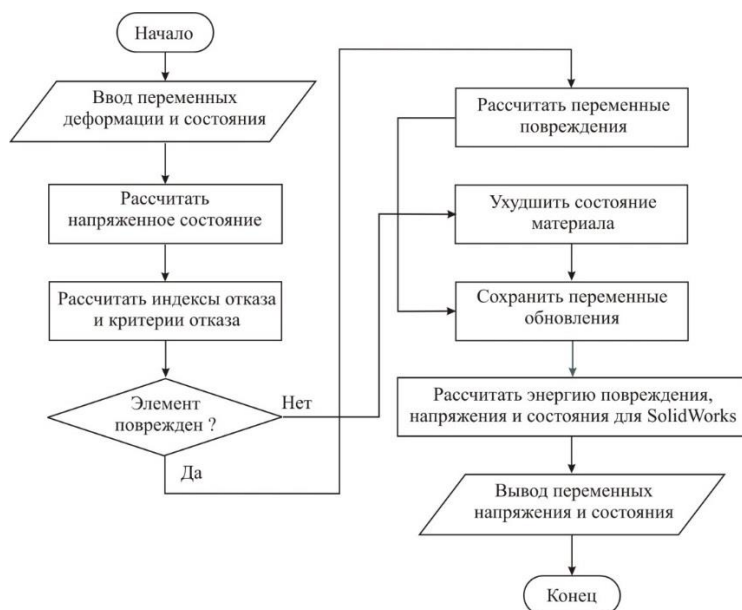


Рис. 2. Алгоритм модели определения повреждения изоляции ТЭД

На уровне слоя моделируются два явления повреждения: неупругое поведение, вызванное микроскопическими повреждениями, и растрескивание слоя пропитки. Предполагается, что первое происходит только из-за напряжений сдвига, тогда как растрескивание слоя пропитки происходит из-за комбинации сдвиговых и нормальных напряжений с учетом коррекции сжимающих напряжений. Все напряжения относятся к напряжениям слоя в локальной системе координат, тогда как «нагрузка» относится к продольной растягивающей нагрузке, приложенной к изоляции ТЭД, если не указано иное.

Предлагаемая модель включает:

1. Монотонное снижение сцепления слоев изоляции. Как правило, при увеличении $D_{и}$ соответствующие модули упругости уменьшаются.
2. Постепенное рассеивание энергии деформации по мере развития повреждения. Энергия деформации должна быть удалена из системы по мере открытия трещин.
3. Деформации из-за раскрытия трещин распределены по элементу (элементу сопряжения) равномерно.

Модель изоляции ТЭД, разработанная для описания наблюдаемого повреждения от расслаивания, является макроскопической. Микроскопическая модель, описывающая каждую отдельную микротрещину, совершенно невозможна из-за большого количества микротрещин, которые сливаются в макротрещину или расслоение. Был разработан математический подход к прогнозированию разрушения, который дает меру среднего микроскопического повреждения изоляции ТЭД. Мера считается дополнительной переменной внутреннего состояния и включается как часть определяющих отношений для изоляции ТЭД. Следовательно, в дополнение к деформации и температуре также указывается микроскопическое повреждение для конкретной микроскопической пустоты. Этот подход

охватывает кинетику разрушения, которая включает в себя микроскопическое поведение и может, при необходимости, ввести конкретную зависимость скорости высвобождения энергии деформации в определяющее поведение изоляции ТЭД. Процесс разрушения автоматически встроен в зависимость напряжения-деформация изоляции ТЭД, т. е. в насыщенном пропиточным составом слое.

На рисунке 3 приедены результаты расчета напряженно-деформируемого состояния пропиточного слоя изоляции $b_{\text{сп}} = 0,5$ мм.

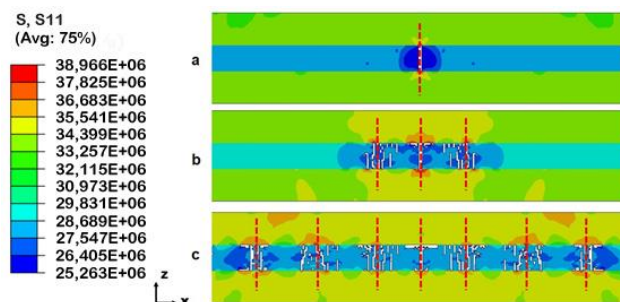


Рис. 3. Усталостные трещины при размере слоя $b_{\text{сп}} = 0,5$ мм
a - $N_i = 10$ циклов; b - $N_i = 100$ циклов; c - $N_i = 1000$ циклов

Поведение материала пропиточного слоя в этом случае приближается к параметрам однородного материала. Возникшая трещина визуализируется как линия, охватывающая весь слой, или как группа дефектов, возникающих одновременно. За вершиной трещины существенное влияние оказывают сжимающие радиальные напряжения, которые увеличиваются по значению и количеству. Подобные концентрации напряжений наблюдались экспериментально. Кроме того, наблюдаются колебания радиального напряжения от напряжения растяжения до напряжения сжатия вблизи вершины трещины. Площадь под радиальными напряжениями в области контакта слоев практически одинакова, что подчеркивает одинаковую скорость выделения энергии для распространения трещины.

Рисунок 4 отражает изменение деформации пропиточного слоя изоляции при линейном увеличении приложенного напряжения вплоть до полного его разрушения при различном количестве циклов нагружения.

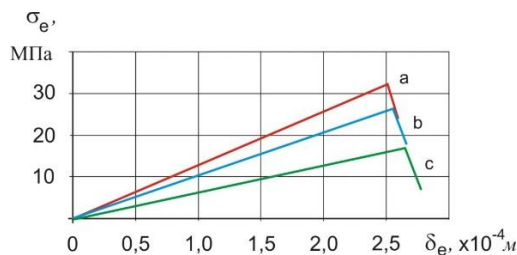


Рис. 4. Зависимость напряжение-деформация при размере слоя $b_{\text{сп}} = 0,5$ мм
a - $N_i = 10$ циклов; b - $N_i = 100$ циклов; c - $N_i = 1000$ циклов

Движение точек сжатия на модели можно исследовать более подробно, рассматривая распределение напряжений вдоль объемных элементов, прилегающих к границе раздела слоев. Компоненты напряжения в соседних элементах очень близки к компонентам напряжений в связанных элементах, поскольку соседние объемные элементы очень малы.

Радиальные напряжения вдоль границы раздела при толщине пропиточного слоя $b_{\text{сп}} = 1,0$ мм в три разных момента времени показаны на рисунке 5.

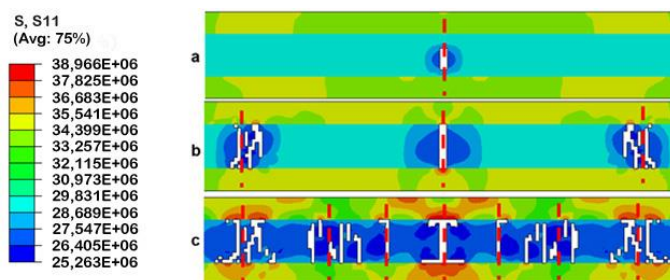


Рис. 5. Усталостные трещины при размере слоя $b_{cp} = 1,0$ мм
а - $N_i = 10$ циклов; б - $N_i = 100$ циклов; в - $N_i = 1000$ циклов

Результаты моделирования циклических напряжений и деформаций представлены на рисунке 6. Эти две модели с толщиной пропиточного слоя $b_{cp} = 0,5$ мм и $b_{cp} = 1,0$ мм имеют различную последовательность возникновения трещин, но места трещин и среднее расстояние между трещинами одинаковы, которое оказалось равным 1,1 мм.

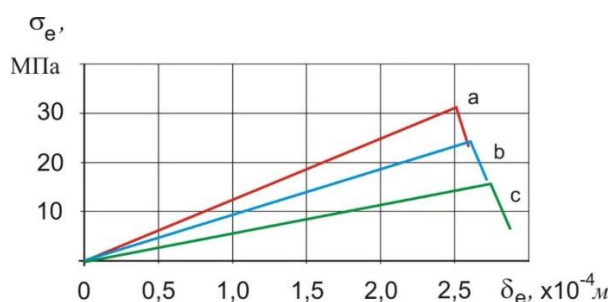


Рис. 6. Зависимость напряжение-деформация при размере слоя $b_{cp} = 1,0$ мм
а - $N_i = 10$ циклов; б - $N_i = 100$ циклов; в - $N_i = 1000$ циклов

Последний случай расчета, показанный на рисунке 7, имеет самый толстый пропиточный слой, равный $b_{cp} = 1,5$ мм. Здесь до полного его разрушения возникает две трещины. Как и в других моделях, было проведено три процесса расчета. Полученные результаты показывают среднюю длину растрескивания около 2,2 мм.

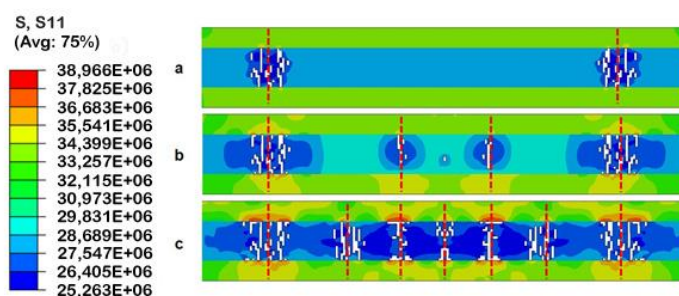


Рис. 7. Усталостные трещины при размере слоя $b_{cp} = 1,5$ мм
а - $N_i = 10$ циклов; б - $N_i = 100$ циклов; в - $N_i = 1000$ циклов

Из-за разницы в толщине материала возникновение трещин расчет с большим размером пропиточного слоя подтверждает его меньшую прочность, которая наблюдается при деформации ниже, чем при деформации слоя меньшей толщины. Причина в том, что трещина в середине возникает раньше всех других трещин.

Поскольку об усталостных свойствах основных компонентов изоляции ТЭД мало что известно, то невозможно сделать надлежащую оценку его усталости. Оценка срока службы с точки зрения того, сколько необходимо циклов до отказа по данным моделирования, сделать невозможно. Однако на основании результатов моделирования можно сделать некоторые выводы о различных изоляционных материалах. Пропиточный состав - единственный компонент, который, кажется, всегда достигает предела текучести. Однако максимальные

амплитуды напряжения в пропиточном составе указывают на то, что он будет находиться в области малоцикловой усталости. Одна из причин заключается в том, что пластичность, предел прочности и модуль упругости пропиточного состава низкие. Другая причина в том, что он не равномерно распределен по объему паза между всеми проводниками и стеклолентой.

Следует отметить, что места высоких значений градиента температуры очень близки к тем местам, где основные компоненты изоляции имеют максимальную амплитуду напряжений. Исходя из этого, скорее всего, здесь возникнут трещины и расслоения изоляции ТЭД.

Согласно результатам моделирования, пропиточный состав с учетом наличия стеклоленты достигает предела прочности на разрыв всего за несколько циклов и, таким образом, появляются расслоения изоляции ТЭД. Трещины и расслоения, вероятно, возникнут еще до пластической деформации. Область максимального касательного напряжения также является местоположением в изоляции ТЭД, где пропиточный слой и стеклолента, имеющие тонкий соединенный слой подвержены процессу расслоения, что подтверждается аналитическими выражениями для касательного напряжения сдвига, который гласит, что чем меньше толщина соединенного слоя, тем выше касательные напряжения сдвига. С течением времени изоляция ТЭД будет иметь почти такую же температуру, как и медный проводник, и, следовательно, в ней будут возникать более высокие напряжения.

Список литературы

1. **Киселев, И. Г.** Тепловая модель асинхронного тягового электродвигателя тепловоза. / Киселев И. Г., Курилкин Д. Н., Шрайбер М. А. // Известия петербургского университета путей сообщения. – 2021. – Т.18. - №4. – с.460 – 468.
2. **Шрайбер, М. А.** Влияние термомеханической нагрузки на старение изоляции тяговых электродвигателей тепловозов // Известия петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т.19. - №2. – с.242 – 248.
3. **Курилкин, Д. Н.** Моделирование механических напряжений в обмотках тяговых электродвигателей тепловозов. / Курилкин Д. Н., Романова А. А., Шрайбер М. А. // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2021. - №2. – с.46 – 48.
4. **Шрайбер, М. А.** Моделирование воздействия неоднородности материала изоляции тяговых электрических машин на процессы роста усталостных трещин // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. - №3(99). – с. 42 – 45.
5. **Шрайбер, М. А.** Моделирование напряжений в изоляции ТЭД тепловозов. / Шрайбер М. А., Грачев В. В., Грищенко А. В., Базилевский Ф. Ю. // Вестник транспорта Поволжья. – 2025. - №2 (110). – с.147 - 151.

References

1. **Kiselev, I. G.** Thermal model of an asynchronous traction electric motor of a diesel locomotive. / Kiselev I. G., Kurilkin D. N., Shraiber M. A. // Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering. - 2021. - Vol. 18. - No. 4. - pp. 460 - 468.
2. **Shraiber, M. A.** Influence of thermomechanical load on the aging of insulation of traction electric motors of diesel locomotives // Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering. - 2022. - Vol. 19. - No. 2. - pp. 242 - 248.
3. **Kurilkin, D. N.** Modeling of mechanical stresses in the windings of traction electric motors of diesel locomotives. / Kurilkin D. N., Romanova A. A., Shraiber M. A. // Electronics and electrical equipment of transport. - 2021. - No. 2. - pp. 46 - 48.
4. **Shraiber, M. A.** Modeling the impact of inhomogeneity of insulation material of traction electric machines on the growth processes of fatigue cracks // Bulletin of Transport of the Volga Region. - 2023. - No. 3 (99). - pp. 42 - 45.
5. **Shraiber, M. A.** Modeling of stresses in the insulation of diesel locomotive traction motors. / Shraiber M. A., Grachev V. V., Grishchenko A. V., Bazilevsky F. Yu. // Bulletin of Transport of the Volga Region. - 2025. - No. 2 (110). - pp. 147 - 151.

M. A. Shrayber, V. N. Ivanov, D. A. Yagudin

FINITE ELEMENT MODEL OF THE AGING OF THE INSULATION OF LOCOMOTIVE TRACTION ELECTRIC MOTORS

Abstract. The methodology is substantiated and an algorithm for modeling multilayer insulation of traction electric motors is developed, which is a simple but promising tool that allows the application of layer adhesion zone modeling strategies in the engineering analysis of problems of the occurrence and growth of cracks, using the capabilities of the finite element method. The results of modeling the propagation of fatigue damage in normal and tangential stress modes, as well as in a mixed loading mode, show that the law of accumulation of fatigue damage differs for the propagation of delamination in different modes due to differences in the mechanism of development. It should be noted that the development of an effective model for the accumulation of fatigue damage requires a large amount of experimental data, which is currently in short supply.

Keywords: traction electric motor, insulation, thermomechanical stresses, insulation aging, fatigue damage, cracking

For citation: Shrayber, M. A. Finite Element Model of Aging of the Insulation of Locomotive Traction Electric Motors / M. A. Shrayber, V. N. Ivanov, D. A. Yagudin. // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 172–178. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_172.

Сведения об авторах

Шрайбер Марина Александровна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО РГУПС),
кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: goshapti4ka@yandex.ru

Иванов Валерий Николаевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО РГУПС),
кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: lt@pgups.ru

Ягудин Данил Альтафович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО РГУПС),
кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,
аспирант,
e-mail: 9gud1n@gmail.com

Information about the authors

Shrayber Marina Alexandrovna

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU),
Chair «Locomotives and Locomotive Engineering»,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: goshapti4ka@yandex.ru

Ivanov Valerij Nikolaevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU),
Chair «Locomotives and Locomotive Engineering»,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: lt@pgups.ru

Yagudin Danil Altafovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU),
Chair «Locomotives and Locomotive Engineering»,
Postgraduate Student,
e-mail: 9gud1n@gmail.com

И. С. Юдин, Р. Р. Часовников, К. Б. Копотун, Е. О. Лагунова, Д. С. Костин

СОВРЕМЕННЫЕ РОССИЙСКИЕ МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫЕ ДЕФЕКТОСКОПЫ СЕРИИ «ЕРМАГ»

Аннотация. В статье рассматриваются современные металлопорошковые дефектоскопы как перспективные средства неразрушающего контроля ферромагнитных материалов. Оценены ключевые тенденции развития оборудования, включая применение высокочувствительных сенсоров, автоматизацию процессов нанесения порошка, внедрение цифровых систем визуализации и алгоритмов машинного зрения для интерпретации дефектных индикаторов. Особое внимание уделено сравнительному исследованию эффективности различных типов и модификаций металлопорошковых установок и конфигураций магнитных полей при контроле изделий сложной геометрии. Продемонстрированы преимущества современных установок в повышении точности диагностирования, снижении влияния и участия человека, а также расширении области применения метода.

Ключевые слова: дефектоскопия, неразрушающий контроль, инновации, производство, дефекты, магнитопорошковый дефектоскоп.

Для цитирования: Современные российские металлопорошковые дефектоскопы серии «ЕРМАГ» / И. С. Юдин, Р. Р. Часовников, К. Б. Копотун и др. // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 179–185. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_179.

Введение

В области вагоностроения, локомотивостроения, а также ремонта и обслуживания подвижного состава железных дорог существует определенная тенденция к повышению качества выходной продукции. Это напрямую определяет состояние безопасности движения железных дорог России. В текущее время неотъемлемой частью всего производства и ремонта является диагностика и испытание узлов и деталей подвижного состава. Именно дефектоскопирование играет ключевую роль в определении состояния и остаточного ресурса той или иной составляющей подвижного состава.

Основываясь на официальной статистике ОАО «РЖД» за последние пять лет наблюдается увеличение количества отцепляемых вагонов по причине выхода из строя одного или нескольких основных узлов (рис. 1). Согласно представленной диаграмме, наиболее частой причиной отцепки вагона в текущий ремонт является неисправность колёсной пары.

Колёсная пара занимает ключевое место в конструкции подвижного состава железнодорожного транспорта, так как именно на неё ложатся основные динамические и статические нагрузки. Этот узел играет важную роль в обеспечении передачи сил между колесом и рельсом, а также в поддержании устойчивости движения и безопасности поезда в различных условиях эксплуатации. Поэтому усовершенствование методов диагностики колёсных пар становится важным шагом для повышения безопасности на железной дороге. Прогресс в области неразрушающего контроля и внедрение автоматизированных систем мониторинга позволяют эффективно обнаруживать неисправности, предсказывать срок службы компонентов и оптимизировать процессы технического обслуживания.

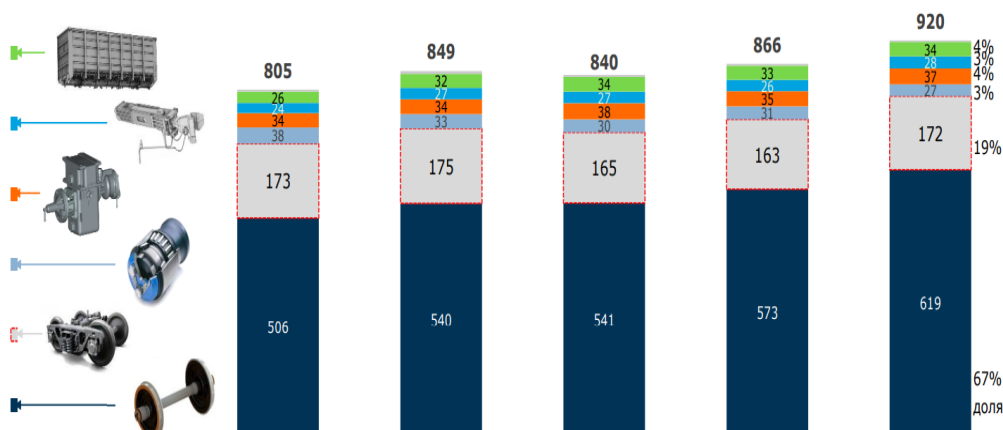


Рис. 1. Статистика отцепок вагонов за 2021-2025 годы

Значительная часть неисправностей на пути следования может быть исключена путем грамотного диагностирования магнитопорошковым методом контроля (далее МПК) состояния колесных пар и назначения срока гарантированной безотказной работы. Этим вопросом занимается русская компания ООО «АктивТестГрупп», её инженеры разрабатывают и внедряют в производство современные дефектоскопы серии «ЕрМаг», которые стали следующим шагом на пути к совершенству неразрушающего контроля подвижного состава и его составных узлов (рис. 2).

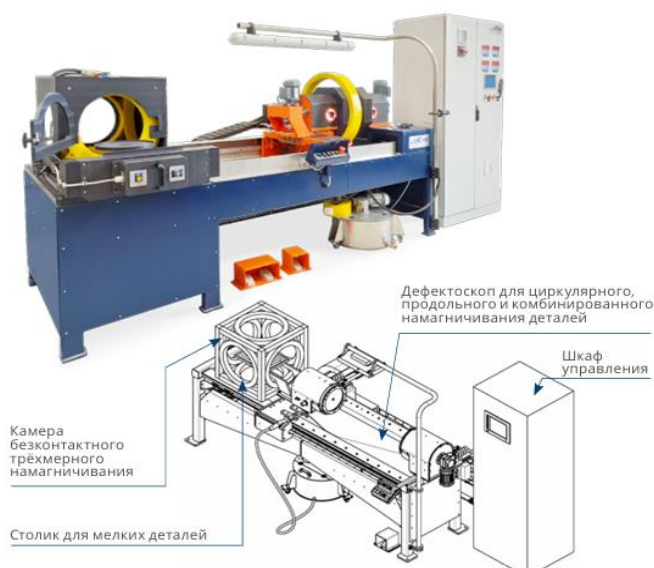


Рис. 2. Магнитопорошковый дефектоскоп ЕрМаг 1000 3D

Дефектоскопы серии «ЕрМаг», имеют схожие технические возможности. Они показывают высокую степень универсальности при контроле различных изделий. В зависимости от конфигурации дефектоскопа возможно обследование деталей различной длины, диаметра и формы – от коротких заготовок до валов и других крупных деталей длиной до нескольких метров.

Каждый дефектоскоп имеет базовую комплектацию:

- Контактно-зажимные устройства с электромеханическим / пневматическим приводом для зажима детали и пропускания тока циркулярного намагничивания;
- Соленоид продольного намагничивания / электромагниты продольного намагничивания, встроенные в контактно-зажимные устройства;
- Система вращения детали в контактно-зажимных устройствах;

- Неподвижные и подвижные ролики-опоры для позиционирования деталей переменного диаметра и сложной формы;
- Суспензионная система с функцией размагничивания и устройством автоматического перемешивания суспензии;
- Система полива: автоматический полив из адаптивных форсунок и ручной пистолет;
- Система управления: силовой шкаф с сенсорным экраном для задания параметров намагничивания, выносной или установленный на раме дефектоскопа пульт управления, ножной пульт управления;
- Система освещения белым и / или ультрафиолетовым светом на подвижной или фиксированной консоли.

В дефектоскопах «ЕрМаг» реализовано до 18 различных режимов намагничивания – это комбинации продольного, циркулярного, а также комбинированного намагничивания. При намагничивании с продольным током применяется динамическая стабилизация тока: амплитуда тока поддерживается постоянной при изменении нагрузки (например, при контроле детали с переменным сечением). Это важно, поскольку сопротивление такого соленоида может сильно изменяться, что без стабилизации приведёт к нестабильному магнитному полю и непредсказуемой чувствительности (рис. 3).

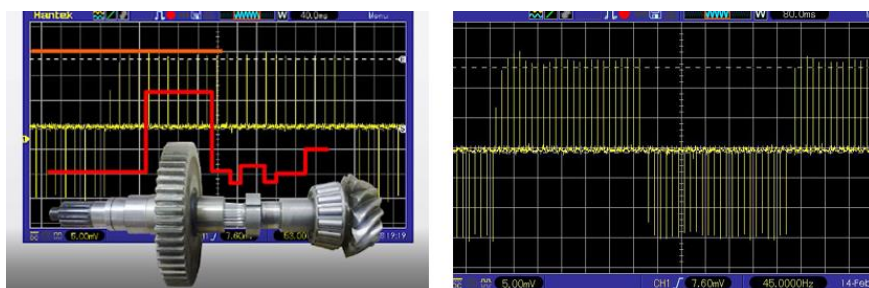


Рис. 3. Динамическая стабилизация тока

Данная серия дефектоскопов позволяет существенно поднять производительность труда и сократить количество рабочих путем высокой степени автоматизации процесса диагностирования. Исключение человеческого фактора позволит практически избавиться от дальнейших отказов работы узлов подвижного состава. Автоматизация охватывает также процесс нанесения и рециркуляции магнитной суспензии, что гарантирует стабильное проявление дефектов и сокращает расход материалов. Размагничивание выполняется автоматически с использованием переменного тока с постепенным снижением амплитуды, что снимает остаточную намагниченность без ручного вмешательства (рис. 4).

Наименование характеристики	Значение
Максимальный ток циркулярного намагничивания (переменный 50 Гц/переменный 1 Гц/постоянный — однополупериодное выпрямление)	От 200 до 7000 А ($\pm 10\%$)
Максимальное амплитудное значение напряжённости магнитного поля в центре соленоида продольного намагничивания (ток намагничивания переменный 50 Гц/1 Гц, постоянный — однополупериодное выпрямление)	$300 \pm 10\%$ А/см
Частота размагничивающего поля системы продольного/циркулярного намагничивания	50 Гц; 1 Гц
Остаточная намагниченность объекта контроля	не более 3 А/см
Объем суспензионного бака	50 л
Освещенность зоны контроля белым светом	не менее 1000 лк
Номинальная мощность	450 кВА

Рис. 4. Основные параметры магнитного поля

Все эти функции соединены в программной системе управления, которая обеспечивает стабильность и точность результатов, а также возможность настройки параметров под

определенный тип деталей, значительно повышая эффективность и надежность работы (рис. 5).

Оператор управляет процессом МПК через панель, в которой он настраивает параметры намагничивания и размагничивания, а именно тип магнитного поля (циркулярное, продольное или комбинированное), тип тока, амплитуду и длительность. Система также составляет последовательность операций, включая фиксацию детали, подачу или рециркуляцию магнитной суспензии, намагничивание и размагничивание (рис. 6). В ходе работы токи стабилизируются, обеспечивая равномерное магнитное поле, которое необходимо для обнаружения трещин и дефектов в деталях. Наличие автоматических систем управления позволяет минимизировать участие оператора. В системе присутствует встроенная память для параметров контроля различных типов деталей, это позволяет быстро переключаться между режимами при проверках без необходимости дополнительных настроек. Данная функция ускоряет процесс диагностирования, повышает стабильность и снижает вероятность ошибок оператора.



Рис. 5. Шкаф управления

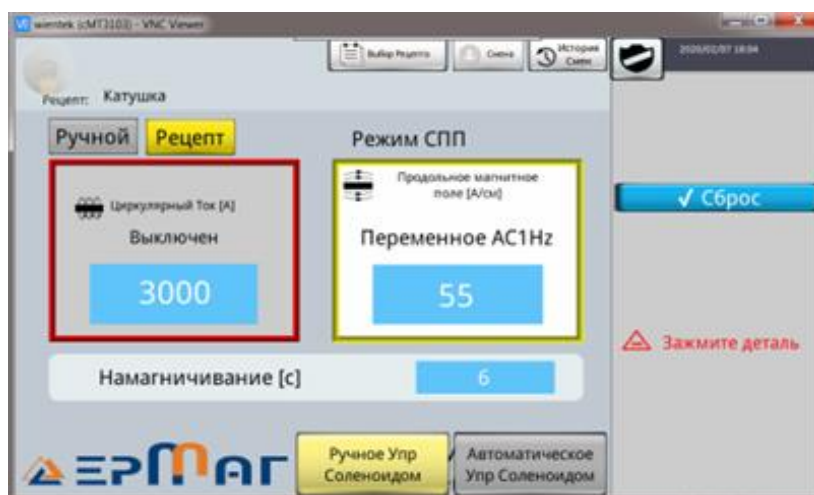


Рис. 6. Панель управления параметрами намагничивания на сенсорном экране

Дефектоскопы позволяют использовать различные порошки, а именно цветные и люминесцентные. Использование люминесцентных порошков позволяет более выразительно проявлять дефекты, поскольку подсветка ультрафиолетом делает накопление порошка на дефектах легко заметным (рис. 7).

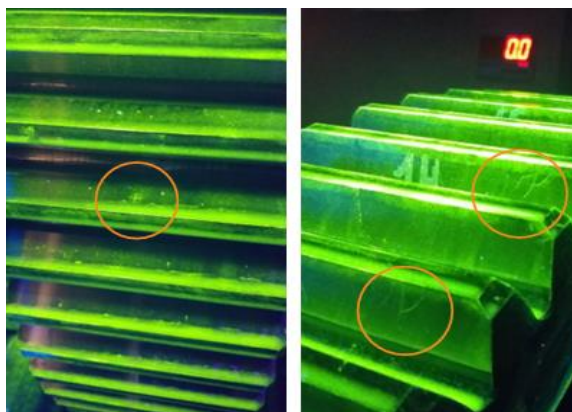


Рис. 7. Выявление искусственного дефекта и трещин на зубцах с использованием люминесцентного порошка

Люминесцентные порошки светятся при облучении ультрафиолетом, и без затемнения рабочей зоны свечение этих частиц может быть едва заметным или полностью теряться на фоне окружающего света. В связи с этим требуется дополнительное оснащение в виде затемняющей кабины.

Затемняющая кабина (рис. 8) ограничивает попадание постороннего освещения, формируя тёмное пространство, где любые дефекты, проявленные флуоресцентными частицами, становятся легко различимыми.



Рис. 8. Затемняющая кабина

Ультрафиолетовые светильники создают ультрафиолетовое освещение поверхности детали, что обеспечивает равномерное свечение частиц и чёткую визуализацию дефектов (рис. 9).

С помощью данного подхода можно проводить неразрушающий контроль наиболее ответственных узлов и деталей, такие как зубчатые колеса, дорожки качения внутренних и наружных колец роликовых подшипников, ролики подшипника.



Рис. 9. Ультрафиолетовый светильник

Заключение.

Дефектоскопы серии «ЕрМаг» высокоэффективны и надежны в процессах неразрушающего контроля. Они выявляют дефекты на узлах и деталях подвижного состава с отличительной точностью. Данные устройства имеют возможности использования разных схем намагничивания, а также могут использоваться как автоматизированные комплексы с возможностью ручных режимов работы. Существует возможность использования цветных и люминесцентных порошков. Можно оснащать аппараты дополнительными функциями, такие как интеграция с оснасткой, подача суспензий и использование ультрафиолетовых светильников, которые позволяют настроить дефектоскопирование под специальные нужды предприятий.

Список литературы

1. ООО «ПК НЭВЗ» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nevz.com/contact.php> (дата обращения 14.11.2025).
2. ООО «АктивТестГруп» [Электронный ресурс]. – URL: <https://activetest.ru> (дата обращения 14.11.2025).
3. ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rzd.ru> (дата обращения 14.11.2025).

References

1. LLC "PK NEVZ" [Electronic resource]. - URL: <https://www.nevz.com/contact.php> (date of access 11/14/2025).
2. LLC "AktivTestGroup" [Electronic resource]. – URL: <https://activetest.ru> (date accessed 11/14/2025).
3. JSC Russian Railways [Electronic resource]. – URL: <https://www.rzd.ru> (accessed 11/14/2025).

I. S. Iudin, R. R. Chasovnikov, E. A. Kopotun, E. O. Lagunova, D. S. Kostin

**MODERN RUSSIAN METAL POWDER FLAW DETECTORS
OF THE «ERMAG» SERIES**

Abstract. This article examines modern metal-powder flaw detectors as promising non-destructive testing tools for ferromagnetic materials. Key trends in equipment development are assessed, including the use of highly sensitive sensors, automated powder application processes, and the introduction of digital visualization systems and machine vision algorithms for interpreting defect indicators. Particular attention is paid to a comparative study of the effectiveness of various types and modifications of metal-powder systems and magnetic field configurations when testing complex-geometry components. The advantages of modern systems in improving diagnostic accuracy, reducing human intervention and involvement, and expanding the scope of application of the method are demonstrated.

Keywords: flaw detection, non-destructive testing, innovation, defects, quality control, magnetic particle flaw detector.

For citation: Modern Russian Metal Powder Flaw Detectors of the «ERMAG» Series / I. S. Iudin, R. R. Chasovnikov, E. A. Kopotun, et all // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobsheniya. – 2025. – № 4. – P. 179–185. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_179.

Сведения об авторах**Юдин Иван Семенович**

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
студент,
e-mail: yudin.ivan.2002@mail.ru

Information about the authors**Iudin Ivan Semenovich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Student,
e-mail: yudin.ivan.2002@mail.ru

Часовников Роман Романович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
студент,
e-mail: fallenYami@yandex.ru

Копотун Кира Борисовна

Российский университет транспорта (РУТ
(МИИТ)),
студент,
e-mail: kirakopotu@yandex.ru

Лагунова Елена Олеговна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Строительная механика»,
заведующий кафедрой,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: eolagunova@rgups.ru

Костин Дмитрий Сергеевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
студент,
e-mail: Dimon12rnd@gmail.com

Chasovnikov Roman Romanovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Student,
e-mail: fallenYami@yandex.ru

Kopotun Kira Borisovna

Russian University of Transport (RUT
(MIIT)),
e-mail: kirakopotu@yandex.ru

Lagunova Elena Olegovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Structural Mechanics»,
Head of the Chair,
Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: eolagunova@rgups.ru

Kostin Dmitriy Sergeevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Student,
e-mail: Dimon12rnd@gmail.com

А. А. Лохматов

СОСТОЯНИЕ РЕМОНТНОЙ БАЗЫ СПЕЦИАЛЬНОГО САМОХОДНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ ОАО «РЖД» : СИСТЕМНЫЕ ПРОТИВОРЕЧИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Аннотация. Третий этап развития Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей предусматривает увеличение провозной способности Восточного полигона ОАО «РЖД» до 270 млн т к 2032 г. и сопровождается ростом объёмов как строительства, так и ремонта пути. Технологическим ресурсом этих работ служит специальный самоходный подвижной состав, техническая готовность которого поддерживается ремонтной базой. С 1 апреля 2025 г. единая Восточная дирекция по эксплуатации путевых машин упразднена; её функции переданы службам механизации в составе дирекций инфраструктуры четырёх железных дорог полигона. Ремонт выполняется в двух организационных контурах – хозяйственным способом силами служб механизации и по договору сетевым подрядчиком. Установлено, что 18 % парка отнесено к неэксплуатируемому, фактическая выработка машин в два – четыре раза ниже паспортной вследствие ограниченной продолжительности технологических «окон», а ремонтные предприятия восточных дорог при наибольшем спросе располагают наименьшими собственными мощностями. Сформулированы четыре системных противоречия – старение и неоднородность парка, кратный рост спроса (по прогнозу) на путевые работы в 2024–2030 гг., пространственное и сезонное несоответствие размещения и загрузки ремонтных мощностей спросу, отсутствие формализованного критерия распределения работ между хозяйственным и подрядным контурами исполнения. На их основе обоснованы практические направления развития ремонтной базы и определена постановка научной задачи её рационального решения к 2030 г.

Ключевые слова: Восточный полигон, специальный самоходный подвижной состав, ремонтная база, служба механизации, размещение ремонтных мощностей, неэксплуатируемый парк, двухконтурная организация ремонта, сезонность путевых работ.

Для цитирования: Лохматов, А. А. Состояние ремонтной базы специального самоходного подвижного состава на восточном полигоне ОАО «РЖД» : системные противоречия и направления развития / А. А. Лохматов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 186–196. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_186.

Введение

Развитие Восточного полигона ОАО «РЖД» определено Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года, утверждённой распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р [1], и долгосрочными программами развития компании. Полигон объединяет четыре железные дороги – Красноярскую, Восточно-Сибирскую, Забайкальскую и Дальневосточную; в его границах расположены Байкало-Амурская (БАМ) и Транссибирская магистрали, обеспечивающие экспортные перевозки в страны Азиатско-Тихоокеанского региона [2].

Третий этап развития БАМа и Транссиба, утверждённый в 2024 г. с объёмом инвестиций 3,7 трлн руб. [3], предусматривает укладку сплошных вторых главных путей, сооружение более 300 объектов инфраструктуры, в том числе дублёров крупных искусственных сооружений, и доведение провозной способности полигона до 270 млн т к 2032 г. Программа путевых работ при этом включает не только ремонт пути (капитальный и

средний), но и его новое строительство – сооружение вторых главных путей и развитие станций. И строительство, и ремонт пути выполняются с применением специального самоходного подвижного состава (далее – СПС): выправочно-подбивочных, щебнеочистительных машин, путеукладочных кранов, мотовозов, стабилизаторов пути и иной путевой техники, классификация которой установлена инструкцией по учёту специального подвижного состава (распоряжение ОАО «РЖД» от 14 декабря 2018 г. № 2691/р) [4].

Техническую готовность парка СПС обеспечивает ремонтная база, до 1 апреля 2025 г. входившая в единую Восточную дирекцию по эксплуатации путевых машин. С указанной даты дирекция упразднена, а её функции переданы службам механизации в составе региональных дирекций инфраструктуры (далее – ДИ) каждой из четырёх железных дорог полигона; линейным звеном остаются механизированные дистанции инфраструктуры. Единые правила технической эксплуатации и ремонта СПС закреплёны распоряжением ОАО «РЖД» от 27 декабря 2024 г. № 3341/р [5]. Состав производственных площадок при реорганизации сохранён – изменился характер управления: оно стало дорожным, а не полигональным. Ремонт СПС организован в двух контурах: хозяйственным способом – силами служб механизации на собственных площадках и по договору, силами сетевого подрядчика на специализированных ремонтных участках.

Унаследованная конфигурация ремонтной базы формировалась под иную географию и иную интенсивность путевых работ, тогда как программа 2024–2032 гг. наращивает спрос преимущественно в восточной части полигона, а реорганизация 2025 г. распределила управление между четырьмя самостоятельными ДИ. Возможности и ограничения такой конфигурации до настоящего времени не получили количественной оценки. Цель данной работы – системный анализ состояния ремонтной базы СПС Восточного полигона, выявление системных противоречий и обоснование практических направлений её развития. Эмпирической основой служат первичные документы учёта ОАО «РЖД» за 2024–2025 гг.: справка технического состояния парка, планы ремонта по подрядному и хозяйственному способам, реестр производственных площадок. Числовые величины приводятся диапазонами.

1. Парк специального самоходного подвижного состава

Численность СПС и статусы

По данным учёта на ноябрь 2025 г. парк СПС четырёх железных дорог Восточного полигона составляет 1358 единиц. Распределение по дорогам и статусу эксплуатации приведено в таблице 1.

Таблица 1

Распределение парка СПС Восточного полигона по дорогам и статусу эксплуатации

Дорога	Всего, ед.	В эксплуатации	НЭП, ед.	Доля НЭП, %
Дальневосточная	452	362	90	19,9
Восточно-Сибирская	325	292	33	10,2
Забайкальская	327	255	72	22,0
Красноярская	254	205	49	19,3
Итого	1358	1114	244	18,0

Источник: справка технического состояния СПС, методология учёта по распоряжению ОАО «РЖД» № 658/р [6].

К неэксплуатируемому парку (далее – НЭП) отнесены 244 единицы (18 % парка) – машины, не находящиеся в эксплуатации: ожидающие ремонта, продления назначенного срока службы или списания. Доля НЭП заметно различается по дорогам: от 10 % на Восточно-

Сибирской до 20 % на Дальневосточной и 22 % на Забайкальской. Структура причин на Дальневосточной дороге (значимые доли машин в плановом и неплановом ремонте, в ожидании ремонта) свидетельствует не о консервации парка, а об интенсивном прохождении машин через ремонтные мощности при их недостаточности. Наличие крупного фонда НЭП означает, что номинальная численность парка превышает его фактическую технологическую доступность: доля эксплуатируемого парка составляет 0,82 (1114 из 1358 единиц), что ниже целевого коэффициента технической готовности, который должен составлять 0,88.

Возврат части фонда НЭП в эксплуатацию через средний или капитальный ремонт и продление срока службы – наиболее быстрый источник прироста доступного парка до поступления новой техники. Однако восстановление фонда НЭП конкурирует за ограниченные ремонтные мощности с плановым ремонтом эксплуатируемого парка и требует совместного планирования.

Возраст и продление срока службы

Парк характеризуется значительным возрастом. Медиана возраста машин составляет 19 лет на Красноярской и Восточно-Сибирской дорогах, 18 лет на Дальневосточной и 14 лет на Забайкальской; относительно молодой парк Забайкальской дороги отражает целевые поставки техники под второй этап развития БАМа в 2014–2020 гг. Доля машин старше 25 лет составляет от 24 % на Забайкальской до 38 % на Восточно-Сибирской дороге.

Назначенного срока службы достигли 207 машин. Эксплуатация таких машин допускается только после установленной процедуры продления срока службы; продление, наряду со списанием, является самостоятельной стратегией управления парком по Положению о планово-предупредительном ремонте СПС (распоряжение ОАО «РЖД» от 14 марта 2014 г. № 659/р) [7]. Машины с исчерпанным назначенным сроком сосредоточены преимущественно на Дальневосточной и Красноярской дорогах, что формирует там повышенный спрос на капитальный ремонт и работы по продлению срока службы.

Сериальная и функциональная структура

Парк включает 132 серии СПС. Десять наиболее массовых серий покрывают 43 % парка, двадцать – 61 %; на остальные серии приходится по несколько машин каждая, что усложняет снабжение запасными частями и поддержание квалификации ремонтного персонала по каждой серии.

По функциональному назначению в парке выделяются: мотовозы (260 единиц по полигону); автомотрисы и автодрезины (110 единиц); путевые гайковёрты (110 единиц); снегоуборочные и снегоочистительные машины (100 единиц); стабилизаторы пути (100 единиц); выправочно-подбивочные машины (65 единиц); щебнеочистительные машины (50 единиц), которые работают совместно с самоходными составами для вывоза засорителей. Наиболее капиталоемкий и дефицитный класс – выправочно-подбивочные машины; 26 из 65 машин этого класса сосредоточены на Дальневосточной дороге, что отражает повышенный спрос на капитальный ремонт пути в зоне БАМа.

Норма и факт выработки; сезонность

Планирование ремонтов осложнено расхождением нормативной и фактической выработки СПС. Фактическая годовая выработка машин ниже паспортной в два-четыре раза. Причина – ограниченная продолжительность технологических «окон» в графике движения: на загруженных направлениях БАМа и Транссиба именно «окна» лимитируют использование путевой техники независимо от её паспортной производительности. Планирование ремонтов по нормативной выработке систематически расходится с фактическим режимом эксплуатации; учёт фактической, а не паспортной выработки является методическим требованием к модели развития ремонтной базы.

Ремонтная нагрузка распределена в течение года неравномерно. Путевые машины, занятые в тёплый период на строительстве и ремонте пути, ремонтируются преимущественно зимой; снегоуборочная и снегоочистительная техника, работающая зимой, ремонтируется в

тёплый период; моторно-рельсовый транспорт обслуживается круглогодично. Наложение этих календарей создаёт зимний пик загрузки ремонтных предприятий и недогрузку в межсезонье, что снижает эффективность использования постоянных мощностей обоих контуров (рисунок 1).



Рис. 1. Сезонный профиль загрузки ремонтных предприятий и эффект её сглаживания, % от среднемесячного уровня.

Источник: расчёт по структуре парка и календарю ремонтной кампании

2. Сеть производственных площадок

Состав сети и контуры исполнения

Ремонтная база СПС Восточного полигона объединяет 97 производственных площадок, в том числе участок на острове Сахалин. До 1 апреля 2025 г. эти площадки находились в ведении единой Восточной дирекции по эксплуатации путевых машин; после реорганизации на каждой дороге действует служба механизации в составе ДИ с подчинёнными механизированными дистанциями инфраструктуры и их участками.

Состав площадок неоднороден. Различаются базовые предприятия, несущие основной объём ремонта, и вспомогательные участки, выполняющие техническое обслуживание и лёгкий ремонт вблизи мест эксплуатации. Так, на Забайкальской дороге к основным ремонтным предприятиям отнесены три – Завитая, Чита и Урульга, тогда как остальные учтённые площадки являются вспомогательными. Поэтому формальный счёт площадок завышает реальную ремонтную мощность базы.

Ремонт выполняется в двух контурах. Хозяйственный способ – ремонт силами служб механизации на собственных площадках – охватывает преимущественно лёгкий ремонт вблизи мест эксплуатации. Подрядный способ – ремонт по долгосрочному договору силами сетевого подрядчика (ООО «РПТ Групп») на аттестованных ремонтных участках – концентрирует ремонты повышенной трудоёмкости. Часть подрядных ремонтных участков размещена на собственных площадках подрядчика, часть – на площадях служб механизации; балансовая принадлежность площадки определяет владельца имущества, но не исполнителя работ. Аттестованная сеть подрядных участков в восточной части полигона разрежена, а часть подрядного ремонта выполняется на сетевых участках за пределами полигона.

Концентрация капитального ремонта и собственные мощности дорог

Капитальный ремонт сосредоточен на ограниченном числе предприятий, преимущественно в западной части полигона – на базах Базаиха (Красноярская дорога) и Иркутск-Сортировочный (Восточно-Сибирская дорога). Полная ремонтная нагрузка, напротив, нарастает к востоку. Наибольший годовой объём ремонта приходится на Дальневосточную дорогу, за ней следуют Забайкальская, Красноярская и Восточно-Сибирская (рисунок 2). При этом восточные дороги выполняют на собственных площадках лишь часть своего объёма, передавая ремонты повышенной трудоёмкости сетевому подрядчику, в том

числе на удалённые участки за пределами полигона: на Дальневосточной дороге доля подряда превышает половину. Сочетание наибольшего спроса с наименьшими собственными мощностями делает восточные дороги наиболее зависимыми от подрядного контура и от протяжённых маршрутов доставки СПС в ремонт.

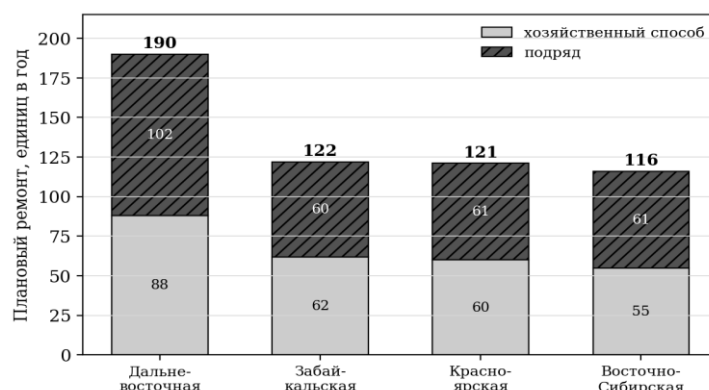


Рис. 2. Полная ремонтная нагрузка по дорогам Восточного полигона с разделением по контурам исполнения, единиц в год.

Источник: планы ремонта по подряду и хозяйственным способом на 2026 г.

Инвестиционные потребности

Реестр производственных площадок фиксирует план развития ремонтной базы с суммарным объёмом капитальных вложений 11,0 млрд руб. Свыше 92 % этого объёма приходится на Дальневосточную дорогу – прежде всего на развитие предприятий Тынды и Хабаровск (по 5 млрд руб. на каждое). По Забайкальской дороге план существенно скромнее (170 млн руб.), по Красноярской и Восточно-Сибирской дорогам развитие новых предприятий не предусмотрено. Концентрация инвестиционного плана на Дальневосточной дороге подтверждает признанную потребность в развитии восточной части ремонтной базы.

3. Программа путевых работ как внешняя нагрузка

Объёмы строительства и ремонта пути задаёт программа путевых работ ОАО «РЖД», принципы назначения видов ремонта пути установлены распоряжением от 12 февраля 2022 г. № 2888/р [8]. По Восточному полигону объём программы возрастает с 1090 км в 2024 г. до 1990–2030 км в пиковые 2028–2030 гг. – в 1,8 раза за четыре–шесть лет (рисунок 3). Динамика по дорогам неравномерна: Дальневосточная дорога даёт наибольший темп роста (трёхкратного – со 180 до 540 км); Забайкальская лидирует по абсолютному объёму с пиком 620 км в 2029 г.; Восточно-Сибирская и Красноярская увеличивают объём вдвое. На Восточный полигон устойчиво приходится 27–30 % сетевого объёма путевых работ.

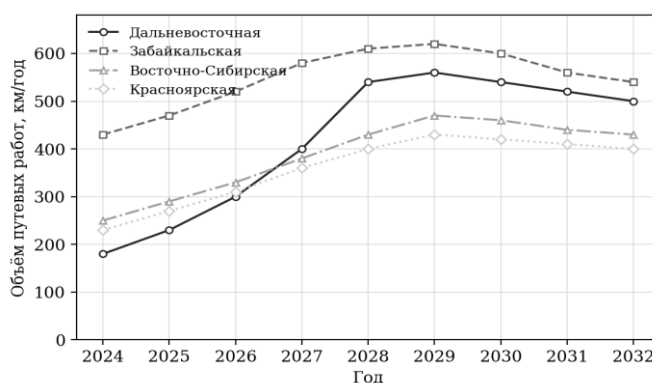


Рис. 3. Объём программы путевых работ Восточного полигона по дорогам, 2024–2032 гг., км в год.

Источник: программа путевых работ [8]

Каждый вид путевых работ через технологическое соответствие «вид работ – класс машин» формирует спрос на машино-смены определённых классов СПС. Рост программы в 1,8 раза означает кратное увеличение требуемой мощности по основным классам – выправочно-подбивочным, щебнеочистительным машинам и стабилизаторам пути – и пропорциональный рост нагрузки на ремонтную базу. Нагрузка не только возрастает, но и смещается в зону БАМа, где собственные ремонтные мощности наименее развиты.

4. Двухконтурная организация ремонта

Соотношение контуров исполнения впервые количественно охарактеризовано по планам ремонта, предполагаемым к реализации в 2026 г. (таблица 2). В соответствии с этими планами на подряд приходится 51,7 % планового объёма (284 единицы), на хозяйственный способ – 48,3 % (265 единиц). Контуры близки по суммарному объёму, однако распределение по видам ремонта принципиально различно.

Таблица 2

Плановый ремонт СПС Восточного полигона на 2026 г. по контурам исполнения

Дорога	Подряд, ед.	Хозспособ, ед.	Всего, ед.	Доля подряда, %
Дальневосточная	102	88	190	53,7
Забайкальская	60	62	122	49,2
Красноярская	61	60	121	50,4
Восточно-Сибирская	61	55	116	52,6
Итого	284	265	549	51,7

Источник: планы ремонта СПС по подряду и хозяйственным способом на 2026 г.

По данным за 2023 г. (всего по Центральной дирекции инфраструктуры выполнено 2953 ремонта СПС на сумму 5,38 млрд руб.) и планов 2024–2026 гг. установлена устойчивая закономерность. Текущий ремонт первого уровня распределён между контурами – в 2023 г. из 1065 таких ремонтов 41 % выполнен по подряду и 59 % хозяйственным способом. Текущий ремонт второго уровня (569 ремонтов в 2023 г.) и капитальный ремонт (324 ремонта) выполнены исключительно по подряду. Таким образом, хозяйственный способ ограничен лёгким текущим ремонтом вблизи мест эксплуатации, а ремонты повышенной трудоёмкости полностью сосредоточены в подрядном контуре.

Двухконтурная организация ремонта соответствует устоявшейся зарубежной практике, при которой инфраструктурный оператор сочетает собственный ремонт с привлечением внешнего подрядчика: на железных дорогах Германии такое сочетание реализовано в Deutsche Bahn [9], во Франции содержание сети ведёт SNCF Réseau [10]; распространена и модель сервиса производителя [11]. Принципиальное отличие постановки настоящего исследования состоит в том, что распределение работ между контурами рассматривается как управляемая переменная, а не как сложившееся организационное условие.

5. Системные противоречия

Сопоставление характеристик парка, ремонтной базы и программы путевых работ позволяет выделить четыре системных противоречия.

Первое – старение и неоднородность парка при отсутствии масштабных закупок. При медианном возрасте 14–19 лет, доля машин старше 25 лет 24 – 38 % и 207 машин с истощенным назначенным сроком службы. Парк формирует растущий поток заявок на ремонт; одновременно эксплуатируемая часть парка сокращается за счёт списания и накопления фонда НЭП (18 %). Поступление новой техники по располагаемой программе

закупок не компенсирует выбытие, вследствие чего растущая потребность в путевых работах сталкивается с сокращающимся располагаемым парком. Неоднородность парка (132 серии) дополнительно усложняет ремонт и снабжение.

Второе – кратный рост спроса на путевые работы в 2024–2030 гг. при сохранении технологии и состава парка. Объем программы по полигону возрастает в 1,8 раза, а на Дальневосточной дороге – до трёх раз. Кратный рост спроса требует кратного увеличения мощности ремонтной базы; при сохранении существующей конфигурации нагрузка превысит её располагаемые возможности, тем более что фактическая выработка парка в два – четыре раза ниже паспортной.

Третье – пространственное и сезонное несоответствие ремонтных мощностей профилю спроса. Капитальный ремонт сосредоточен на западе полигона, тогда как наибольший возраст парка, наибольшая доля фонда НЭП, наибольший темп роста программы и свыше 92 % инвестиционного плана приходится на восточные дороги. Восточные дороги при наибольшем спросе располагают наименьшими собственными мощностями и зависят от удалённых подрядных участков, что удлиняет маршруты доставки СПС в ремонт. К пространственной неравномерности добавляется сезонная: зимний пик ремонтной кампании перегружает предприятия, а межсезонье оставляет их недогруженными.

Четвёртое – отсутствие формализованного критерия распределения работ между контурами и согласованного плана развития мощностей. Соотношение объёмов между хозяйственным и подрядным контурами по видам работ и предприятиям устанавливается в оперативном порядке, а не по явному критерию рациональности. Реорганизация 2025 г. усилила это противоречие: бюджеты, ремонтные программы и инвестиционные планы каждой службы механизации замкнуты на свою ДИ, тогда как объект управления – подвижный парк, протяжённые маршруты доставки и сосредоточение узких видов ремонта в отдельных центрах – сохраняет полигональный характер. Возникает риск несогласованных решений: дублирования и недогрузки соседних предприятий, ослабления кооперации по узким видам ремонта.

6. Предлагаемые направления развития

Выявленные противоречия определяют практические направления развития ремонтной базы СПС Восточного полигона.

Первое – адресное развитие предприятий восточной части ремонтной базы. Приоритет получают предприятия, на которых сходятся наибольший рост программы, наибольший возраст и доля фонда НЭП парка и наибольшая протяжённость доставки в капитальный ремонт: на Дальневосточной дороге – Тында и Хабаровск, на Забайкальской – Завитая и Чита. Это направление согласуется с признанной инвестиционной потребностью (свыше 92 % планируемых вложений приходится на Дальневосточную дорогу) и одновременно обосновывает пересмотр капитальных вложений по Забайкальской дороге в сторону увеличения, поскольку при значимом спросе её план развития минимален.

Второе – формализация распределения работ между хозяйственным и подрядным контурами как управляемой переменной. Хозяйственный контур целесообразно специализировать на массовом текущем ремонте первого уровня вблизи мест эксплуатации, подрядный – на концентрированной мощности по текущему ремонту второго уровня и капитальному ремонту. Число и размещение активных подрядных участков на полигоне определяются решением оптимизационной задачи и оцениваются диапазоном от трёх до шести участков.

Третье – сглаживание сезонной загрузки. Перенос части ремонтов в межсезонье в пределах допустимого опережения норматива позволяет полнее использовать существующие мощности без капитальных вложений и снизить зимний пик загрузки.

Четвёртое – переход к планированию ремонтов по фактической наработке и фактическому техническому состоянию вместо паспортной выработки, с совместным

планированием планового ремонта эксплуатируемого парка и работы с фондом НЭП (восстановление, продление срока службы либо списание).

Пятое – согласование инвестиционных и ремонтных программ четырёх служб механизации как единой производственной системы для предотвращения несогласованных решений после реорганизации 2025 г.

Совокупность направлений формирует постановку научной задачи: *рациональное размещение, специализация и мощность ремонтных предприятий СПС с учётом сезонности, фактической выработки, климатических ограничений, двухконтурной организации ремонта, лимитов инвестиционного бюджета и распределённой между четырьмя ДИ (дирекциями инфраструктуры) структуры управления*. Методической основой служат теория размещения объектов [18–21] и её приложения к ремонтным предприятиям железнодорожного транспорта [22, 23], стандарты управления активами и надёжности [12, 13], дополненные имитационным моделированием сезонной загрузки и анализом стоимости жизненного цикла. В отечественных исследованиях по организации путевого хозяйства и ремонту подвижного состава [14–17] специальный самоходный подвижной состав как объект оптимизации ремонтной базы не рассматривался, что определяет научную новизну постановки.

Заключение

Системный анализ состояния ремонтной базы СПС Восточного полигона ОАО «РЖД» по первичным данным учёта 2024–2025 гг. позволяет сделать следующие выводы.

Программа развития БАМа и Транссиба 2024–2032 гг. формирует требование к развитию ремонтной базы СПС, обеспечивающей техническую готовность парка при росте объёмов строительства и ремонта пути. Парк (1358 единиц на ноябрь 2025 г.) характеризуется значительным старением: 18 % отнесено к фонду НЭП, 207 машин эксплуатируются на продлённом сроке службы, фактическая выработка в два – четыре раза ниже паспортной, доля эксплуатируемого парка (0,82) ниже целевого коэффициента технической готовности 0,88. Сеть из 97 производственных площадок, с 1 апреля 2025 г. распределённая между четырьмя службами механизации, не сбалансирована пространственно и сезонно: капитальный ремонт и собственные мощности сосредоточены на западе, тогда как спрос и инвестиционная потребность находятся на востоке.

Зафиксированы четыре системных противоречия: старение и неоднородность парка; кратный рост спроса на путевые работы; пространственное и сезонное несоответствие мощностей спросу; отсутствие формализованного критерия распределения работ между двумя контурами исполнения – хозяйственным и подрядным, близкими по объёму, но различными по видам ремонта. Практическая значимость работы состоит в обосновании конкретных направлений развития – адресного развития предприятий Тынды, Хабаровск, Завитая и Чита; формализации распределения работ между контурами; сглаживания сезонной загрузки; перехода к планированию по фактическому состоянию; согласования программ четырёх служб механизации. Дефицит ремонтных мощностей устойчиво сосредоточен в восточной части полигона; этот вывод не зависит от принятых числовых допущений.

Научная новизна состоит в первой количественной характеристике ремонтной базы СПС Восточного полигона как единой системы и в постановке задачи её рационального формирования, в которой распределение работ между хозяйственным и подрядным контурами выступает управляемой переменной. Дальнейшие исследования направлены на разработку математической модели размещения и специализации предприятий и имитационной модели сезонной загрузки сети с оценкой эффектов на жизненном цикле.

Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : утверждена распоряжением

References

1. Strategy for the Development of Rail Transport in the Russian Federation through 2030: Approved by Decree of the Government

Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. – Москва, 2008.

2. **Кибалов Е. Б., Быкадоров С. А.** Транссиб и БАМ: системный взгляд на проблему повышения конкурентоспособности // ЭКО. – 2018.

3. Утверждён третий этап модернизации БАМа и Транссиба на 3,7 трлн руб. // Ведомости. – 2024. – 2 мая.

4. Инструкция по учёту, маркировке и классификации специального подвижного состава : распоряжение ОАО «РЖД» от 14 декабря 2018 г. № 2691/р. – Москва, 2018.

5. Единые правила технической эксплуатации и ремонта специального самоходного подвижного состава : распоряжение ОАО «РЖД» от 27 декабря 2024 г. № 3341/р. – Москва, 2024.

6. О пономерном учёте ремонта специального подвижного состава : распоряжение ОАО «РЖД» № 658/р. – Москва, 2025.

7. Положение о системе планово-предупредительного ремонта специального подвижного состава : распоряжение ОАО «РЖД» от 14 марта 2014 г. № 659/р (в действующей редакции). – Москва, 2014.

8. Правила назначения ремонтов железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» от 12 февраля 2022 г. № 2888/р. – Москва, 2022.

9. Machine Maintenance: [сайт] / DB Bahnbaugruppe GmbH. – URL: <https://www.bahnbaugruppe.de/> (дата обращения: 30.11.2025).

10. La maintenance courante du réseau ferré national: [сайт] / SNCF Réseau. – URL: <https://www.sncf-reseau.com/> (дата обращения: 30.11.2025).

11. All-Inclusive maintenance packages: [сайт] / Plasser & Theurer. – URL: <https://www.plassertheurer.com/> (дата обращения: 30.11.2025).

12. ISO 55001:2014. Asset management. Management systems. Requirements. – Geneva: ISO, 2014.

13. EN 50126-1:2017. Railway Applications. The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). – Brussels: CENELEC, 2017.

of the Russian Federation No. 877-r of June 17, 2008. – Moscow, 2008.

2. **Kibalov, E. B., & Bykadorov, S. A.** Trans-Siberian and BAM: A Systemic View of the Problem of Increasing Competitiveness // ECO. – 2018.

3. Third Stage of BAM and Trans-Siberian Modernization Approved at 3.7 Trillion Rubles // Vedomosti. – 2024. – May 2.

4. Instructions on the Accounting, Marking, and Classification of Special Rolling Stock: Order of JSC “Russian Railways” No. 2691/r dated December 14, 2018. – Moscow, 2018.

5. Uniform Rules for the Technical Operation and Repair of Special Self-Propelled Rolling Stock: Order of JSC “Russian Railways” No. 3341/r dated December 27, 2024. – Moscow, 2024.

6. On the Individual Record-Keeping of Repairs to Special Rolling Stock: Order of JSC “Russian Railways” No. 658/r. – Moscow, 2025.

7. Regulations on the System of Scheduled and Preventive Repairs of Special Rolling Stock: Order of JSC “Russian Railways” No. 659/r dated March 14, 2014 (as amended). – Moscow, 2014.

8. Rules for Scheduling Railway Track Repairs: Order of JSC “Russian Railways” No. 2888/r dated February 12, 2022. – Moscow, 2022.

9. Machine Maintenance: [сайт] / DB Bahnbaugruppe GmbH. – URL: <https://www.bahnbaugruppe.de/> (accessed November 31, 2025).

10. La maintenance courante du réseau ferré national: [сайт] / SNCF Réseau. – URL: <https://www.sncf-reseau.com/> (accessed: November 30, 2025).

11. All-Inclusive maintenance packages: [сайт] / Plasser & Theurer. – URL: <https://www.plassertheurer.com/> (accessed November 30, 2025).

12. ISO 55001:2014. Asset management. Management systems. Requirements. – Geneva: ISO, 2014.

13. EN 50126-1:2017. Railway Applications. The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). – Brussels: CENELEC, 2017.

14. **Каменский, В. Б.** Совершенствование системы ведения путевого хозяйства в современных условиях работы железных дорог : дис. д-ра техн. наук : 05.22.06. – Москва, 2005.

15. **Поляков, Н. М.** Система технического обслуживания пути в условиях структурной реформы железнодорожного транспорта (на опыте Приволжской железной дороги) : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06. – 2002.

16. **Скачков, А. А.** Повышение эффективности работы железных дорог восточных регионов за счёт совершенствования системы эксплуатации и ремонта подвижного состава : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. – 2005.

17. **Наговицын, В. С.** Совершенствование системы ремонта тягового подвижного состава железных дорог с учётом фактического технического состояния : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07. – 2006.

18. **Hakimi, S. L.** Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph-theoretic problems // Operations Research. – 1965. – Vol. 13, No. 3. – P. 462–475.

19. **Daskin, M. S.** Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley, 2013. – 538 p. – ISBN 978-0-470-90536-4.

20. **ReVelle C. S., Eiselt H. A.** Location analysis: A synthesis and survey // European Journal of Operational Research. – 2005. – Vol. 165, No. 1. – P. 1–19.

21. Melo M. T., Nickel S., Saldanha-da-Gama F. Facility location and supply chain management: A review // European Journal of Operational Research. – 2009. – Vol. 196, No. 2. – P. 401–412.

22. **Heo, C.** [et al.]. Optimum location analysis for an infrastructure maintenance depot in urban railway networks // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2021. – DOI 10.1007/s12205-021-1496-5.

23. **Tönissen D. D., Arts J. J.** The maintenance location choice problem for railway rolling stock : препринт. – 2020.

14. **Kamensky, V. B.** Improvement of the Track Maintenance System under Modern Railway Operating Conditions: Ph.D. thesis in Technical Sciences: 05.22.06. – Moscow, 2005.

15. **Polyakov, N. M.** Track Maintenance System in the Context of Railway Transport Structural Reform (Based on the Experience of the Volga Railway) : Ph.D. Thesis in Technical Sciences: 05.22.06. – 2002.

16. **Skachkov, A. A.** Improving the Efficiency of Railways in Eastern Regions by Optimizing the Rolling Stock Operation and Repair System : Ph.D. Thesis in Technical Sciences: 05.22.01. – 2005.

17. **Nagovitsyn, V. S.** Improvement of the repair system for railway traction rolling stock considering the actual technical condition: Dissertation ... Doctor of Technical Sciences : 05.22.07. – 2006.

18. **Hakimi, S. L.** Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph-theoretic problems // Operations Research. – 1965. – Vol. 13, No. 3. – P. 462–475.

19. **Daskin, M. S.** Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley, 2013. – 538 p. – ISBN 978-0-470-90536-4.

20. **ReVelle C. S., Eiselt H. A.** Location analysis: A synthesis and survey // European Journal of Operational Research. – 2005. – Vol. 165, No. 1. – P. 1–19.

21. Melo M. T., Nickel S., Saldanha-da-Gama F. Facility location and supply chain management: A review // European Journal of Operational Research. – 2009. – Vol. 196, No. 2. – P. 401–412.

22. **Heo, C.** [et al.]. Optimum location analysis for an infrastructure maintenance depot in urban railway networks // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2021. – DOI 10.1007/s12205-021-1496-5.

23. **Tönissen D. D., Arts J. J.** The maintenance location choice problem for railway rolling stock : preprint. – 2020.

A. A. Lokhmatov

THE STATE OF THE MAINTENANCE FACILITIES FOR SPECIAL SELF-PROPELLED ROLLING STOCK AT THE EASTERN TEST SITE OF RZD : SYSTEMIC CONTRADICTIONS AND DIRECTIONS FOR DEVELOPMENT

Abstract. The third stage of development of the Baikal-Amur and Trans-Siberian highways provides for an increase in the carrying capacity of the Eastern polygon of Russian Railways to 270 million tons by 2032 and is accompanied by an increase in the volume of both construction and track repair. The technological resource for these works is special self-propelled rolling stock, the technical readiness of which is maintained by the repair base. As of April 1, 2025, the unified Eastern Directorate for the operation of track machines has been abolished; its functions have been transferred to the mechanization services within the infrastructure directorates of the four railways of the polygon. Repair is carried out in two organizational circuits: by the economic method using the services of mechanization and under a contract with a network contractor. It has been established that 18% of the fleet is classified as non-operational, the actual production of machines is two to four times lower than the passport value due to the limited duration of technological "windows", and the repair enterprises of the eastern roads have the lowest own capacities, despite the highest demand. Four systemic contradictions have been formulated: the aging and heterogeneity of the fleet, the multiple increase in demand (according to the forecast) for track work in 2024-2030, the spatial and seasonal mismatch between the placement and utilization of repair capacities and the demand, and the lack of a formalized criterion for distributing work between the economic and contractual execution circuits. Based on these findings, practical directions for the development of the repair base have been substantiated, and the scientific task of its rational solution by 2030 has been formulated.

Keywords: Eastern test site, special self-propelled rolling stock, repair base, mechanization service, placement of repair facilities, non-operational fleet, two-circuit repair organization, and seasonal track work.

For citation: Lokhmatov, A. A. The state of the maintenance facilities for special self-propelled rolling stock at the eastern test site of RZD : systemic contradictions and directions for development / A. A. Lokhmatov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 186–196. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_186.

Сведения об авторах

Лохматов Алексей Анатольевич
Открытое акционерное общество
«Российские железные дороги»
(ОАО «РЖД»),
Центральная дирекция инфраструктуры,
г. Москва,
заместитель главного инженера,
e-mail: lokhmatov@bk.ru

Information about the authors

Lokhmatov Alexey Anatolyevich
Open Joint Stock Company Russian
Railways (OJSC Russian Railways),
Central Directorate of Infrastructure,
Moscow,
Deputy Chief Engineer,
e-mail: lokhmatov@bk.ru

*А. В. Черномазов***АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА ДОПУСТИМЫХ МЕЖПОЕЗДНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО УЧАСТКА БЕЛОРЕЧЕНСКАЯ – ТУАПСЕ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Аннотация. В статье рассмотрена концепция автоматизированной системы расчета допустимых межпоездных интервалов для электрифицированного участка Белореченская – Туапсе Северо-Кавказской железной дороги с использованием систем накопления электроэнергии. Показано, что одним из факторов, ограничивающих пропускную способность железнодорожных линий, являются режимы работы системы тягового электроснабжения, особенно на участках со сложным профилем пути и высокой интенсивностью движения поездов. Обоснована актуальность применения систем накопления энергии для приема избыточной энергии рекуперативного торможения и последующего использования ее на тягу поездов. Рассмотрены особенности участка Белореченская – Туапсе, характеризующегося значительными объемами рекуперативной энергии вследствие наличия затяжных спусков и подъемов. Представлена структура автоматизированной системы, включающая цифровую модель тяговой сети, подсистемы мониторинга поездной обстановки и состояния накопителей энергии, а также модули прогнозирования и расчета допустимых межпоездных интервалов. Показано, что использование цифрового двойника участка и методов машинного обучения позволяет повысить точность прогнозирования режимов работы системы тягового электроснабжения. Отмечены энергетические, экономические и экологические преимущества предлагаемого решения, включая повышение пропускной способности линии, сокращение задержек поездов, снижение потребления электроэнергии, уменьшение углеродного следа и повышение эффективности использования энергии рекуперации.

Ключевые слова: пропускная способность, межпоездной интервал, накопители энергии.

Для цитирования: Черномазов, А. В. Автоматизированная система расчета допустимых межпоездных интервалов электрифицированного участка Белореченская – Туапсе на основе использования систем накопления электроэнергии / А. В. Черномазов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 197–201. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_197.

Развитие железнодорожного транспорта в современных условиях характеризуется необходимостью одновременного решения нескольких стратегических задач: повышения пропускной способности инфраструктуры, увеличения энергоэффективности перевозочного процесса, снижения эксплуатационных затрат и минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Особую актуальность данные задачи приобретают для участков со сложным продольным профилем пути и высокой интенсивностью движения поездов.

Одним из таких участков является электрифицированный участок Белореченская – Туапсе Северо-Кавказской железной дороги, являющийся важнейшим элементом транспортного коридора, обеспечивающего перевозки в направлении портов Черноморского побережья. Для данного участка характерны значительные уклоны, большое количество тоннелей и кривых малого радиуса, что приводит к повышенным энергетическим нагрузкам

на систему тягового электроснабжения и накладывает ограничения на размеры движения поездов.

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности работы систем тягового электроснабжения является внедрение систем накопления электроэнергии (СНЭ), обеспечивающих прием избыточной энергии рекуперативного торможения и последующее использование накопленной энергии для тяги поездов. В качестве такого решения предлагается создание автоматизированной системы расчета допустимых межпоездных интервалов движения поездов по условиям электроснабжения участка Белореченская – Туапсе с учетом применения систем накопления электроэнергии.

Актуальность внедрения систем накопления энергии на сегодняшний день обусловлена концепцией устойчивого развития железнодорожного транспорта, которая предполагает максимально эффективное использование энергетических ресурсов. Согласно стратегии научно-технологического развития холдинга ОАО «РЖД», среди ключевых направлений развития выделяют повышение энергетической эффективности, снижение углеродного следа, внедрение технологий низкоуглеродной энергетики, сокращение негативного воздействия транспортной системы на окружающую среду.

Одним из наиболее значимых источников повышения энергоэффективности является использование энергии рекуперативного торможения. При использовании рекуперации тяговые электродвигатели локомотива или электропоезда переходят в генераторный режим и возвращают электроэнергию в контактную сеть. Однако фактическое использование этой энергии возможно только при наличии в данный момент других потребителей на междоустанционной зоне, что не всегда удается достичь. На практике значительная часть рекуперативной энергии остается невостребованной и утилизируется в виде тепла. По данным исследований российских и зарубежных ученых, доля неиспользуемой энергии рекуперации может достигать половины от общего объема генерируемой энергии торможения.

Использование систем накопления энергии (СНЭ) позволяет аккумулировать избыточную энергию рекуперации и впоследствии возвращать ее в тяговую сеть в периоды повышенного энергопотребления.

Участок Белореченская – Туапсе является одним из наиболее сложных по условиям эксплуатации участков железных дорог России. Его особенностями являются наличие затяжных подъемов и спусков, значительные колебания поездной нагрузки, высокая доля грузового движения, ограниченная пропускная способность отдельных перегонов.

Как указывалось, ранее во время движения по затяжным спускам электроподвижной состав генерирует значительные объемы рекуперативной энергии, при этом на горных участках железных дорог объем энергии рекуперации может



составлять до 15–25 % общего расхода электроэнергии на тягу. Следовательно, рассматриваемый участок обладает значительным потенциалом для применения систем накопления энергии.

Одним из факторов, ограничивающих пропускную способность железнодорожных линий, является пропускная способность системы тягового электроснабжения. При сгущении движения поездов возникают значительные токовые нагрузки, вызывающие повышенные потери напряжения, что в свою очередь создает ограничения по допустимым токам оборудования и приводит к снижению напряжения на токоприемниках. В ряде случаев минимально допустимый межпоездной интервал определяется не условиями безопасности движения, а именно возможностями системы электроснабжения. Объясняется это тем, что при недостаточном уровне напряжения ухудшаются тяговые характеристики локомотивов, снижается сила тяги, увеличивается время разгона.

Автоматизированная система расчета межпоездных интервалов представляет собой цифровой комплекс поддержки принятия решений, выполняющий непрерывный мониторинг режима работы участка. В состав системы входят:

- подсистема сбора данных;
- цифровая модель тяговой сети;
- система мониторинга поездной обстановки;
- система контроля состояния накопителей энергии;
- модуль прогнозирования режимов;
- модуль расчета допустимых межпоездных интервалов.

Источниками информации системы расчета межпоездных интервалов являются:

- устройства телемеханики тяговых подстанций;
- системы микропроцессорного учета электроэнергии;
- локомотивные системы диагностики;
- автоматизированные системы управления движением поездов.

На основе поступающих данных формируется цифровой двойник участка, после чего в режиме реального времени выполняется моделирование электрических режимов тяговой сети. В результате проводимого анализа автоматизированная система выполняет расчет допустимого интервала на основе следующих параметров: положения поездов, массы поездов, профиля пути, состояния тяговой сети, режима работы тяговых подстанций, запаса энергии в накопителях и прогнозируемого потребления мощности. Для каждого прогнозируемого сценария движения вычисляются напряжения в узлах контактной сети, токи фидеров, потери мощности, остаточная емкость накопителей. После этого определяется минимальный интервал движения, при котором выполняются ограничения по напряжению на токоприемнике, по нагреву оборудования, допустимым токам контактной сети, режимам работы подстанций.

Применение методов машинного обучения позволяет дополнительно повысить точность прогнозирования нагрузок. Исследования, опубликованные в журналах *Applied Energy* и *Electric Power Systems Research*, показывают, что использование нейросетевых моделей позволяет повысить точность прогнозирования тяговых нагрузок на 10–20 % по сравнению с традиционными методами.

Одним из важнейших преимуществ внедрения СНЭ является снижение негативного воздействия на окружающую среду. Основные экологические эффекты включают сокращение потребления электроэнергии, снижение выбросов парниковых газов, уменьшение тепловых потерь, снижение нагрузки на энергосистему. Особенно важен тот факт, что при использовании энергии рекуперации исключается работа балластных сопротивлений при рекуперативном торможении. В традиционной схеме избыточная энергия преобразуется в тепло и безвозвратно теряется, а при использовании накопителей эта энергия сохраняется и повторно используется для тяги поездов.

По данным международных исследований, применение систем накопления энергии на железнодорожном транспорте позволяет сократить потребление энергии на 10–30 %. Экономический эффект от внедрения автоматизированной системы расчета межпоездных интервалов с использованием СНЭ формируется за счет нескольких составляющих.

Первая составляющая связана с возвратом энергии рекуперации. Вторая составляющая обусловлена повышением пропускной способности участка. Третья составляющая связана с уменьшением количества задержек поездов. Четвертая составляющая заключается в снижении потребности в капитальных вложениях на развитие инфраструктуры.

Для грузонапряженного участка Белореченская – Туапсе экономический эффект может быть существенно выше вследствие значительного объема рекуперативной энергии и высокой стоимости задержек поездов.

Дальнейшее развитие рассматриваемой технологии связано с формированием интеллектуальных энергетических систем железнодорожного транспорта. Перспективными направлениями являются создание цифровых двойников тяговых сетей, применение искусственного интеллекта для управления накопителями, интеграция накопителей с возобновляемыми источниками энергии, использование распределенных накопителей вдоль линии, внедрение технологий предиктивного управления энергопотоками.

Таким образом, рассматриваемый проект соответствует современным мировым тенденциям развития интеллектуальных энергетических систем железнодорожного транспорта и способен обеспечить значительный технологический, экономический и экологический эффект для Северо-Кавказской железной дороги и холдинга ОАО «РЖД» в целом.

Список литературы

1. Цифровая железная дорога и управление тяговым электроснабжением / Н. А. Попова, В. К. Чирков, А. В. Бутенко, Р. К. Свиридов // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи: Сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 01–02 марта 2024 года. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 86–90.
2. **Логунова, П. А.** Применение метода восстановления поездной ситуации для определения потерь энергии на однопутном участке постоянного тока при наличии двухпутных вставок / П. А. Логунова, В. А. Осипов // Транспорт: наука, образование, производство : Материалы Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 24–26 апреля 2024 года. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 103–106.
3. **Бодров, П. А.** Предиктивный анализ состояния объектов как новая стратегия технической эксплуатации электрифицированных железных дорог /

References

1. Digital Railway and Traction Power Supply Management / N. A. Popova, V. K. Chirkov, A. V. Butenko, R. K. Sviridov // Transport Power Engineering. Current Problems and Tasks: Collection of Scientific Papers of the VIII International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, March 1–2, 2024. – Rostov-on-Don: Rostov State Transport University, 2024. – Pp. 86–90.
2. **Logunova, P. A.** Application of the Train Situation Reconstruction Method to Determine Energy Losses on a Single-Track DC Section in the Presence of Double-Track Inserts / P. A. Logunova, V. A. Osipov // Transport : Science, Education, Production : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, April 24–26, 2024. – Rostov-on-Don : Rostov State University of Railway Engineering, 2024. – P. 103–106.
3. **Bodrov, P. A.** Predictive analysis of the state of objects as a new strategy for the technical operation of electrified railways / P. A. Bodrov, N. A. Popova // Engineering

П. А. Бодров, Н. А. Попова // Инженерный
вестник Дона. – 2021. – № 8 (80). – С. 231–240.

Bulletin of the Don. – 2021. – No. 8 (80). –
P. 231–240.

A. V. Chernomazov

**AUTOMATED SYSTEM FOR CALCULATING PERMISSIBLE INTERTRAIN SPACES
ON THE ELECTRICIFIED BELORECHENSKAYA–TUAPSE SECTION BASED
ON THE USE OF ELECTRICITY STORAGE SYSTEMS**

Abstract. This article examines the concept of an automated system for calculating permissible intertrain spacing on the Belorechenskaya – Tuapse electrified section of the North Caucasus Railway using energy storage systems. It is shown that one of the factors limiting the capacity of railway lines is the operating modes of the traction power supply system, especially on sections with complex track profiles and high train traffic volumes. The relevance of using energy storage systems to capture excess energy from regenerative braking and subsequently use it for train traction is substantiated. This paper examines the specific features of the Belorechenskaya–Tuapse section, which is characterized by significant volumes of regenerative energy due to long descents and climbs. The paper presents the structure of an automated system, including a digital model of the traction network, subsystems for monitoring train conditions and energy storage device status, as well as modules for forecasting and calculating permissible intertrain intervals. It is demonstrated that the use of a digital twin of the section and machine learning methods improves the accuracy of forecasting traction power supply system operating modes. The energy, economic, and environmental benefits of the proposed solution are highlighted, including increased line capacity, reduced train delays, reduced electricity consumption, a reduced carbon footprint, and improved regenerative energy efficiency.

Keywords: capacity, train interval, energy storage devices.

For citation: Chernomazov, A. V. Automated system for calculating permissible intertrain spaces on the electrified Belorechenskaya–Tuapse section based on the use of electricity storage systems / A. V. Chernomazov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 197–201. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_197.

Сведения об авторах

Черномазов Александр Владимирович
главный инженер Северо-Кавказской
железной дороги (филиала ОАО «РЖД»),
тел. 8 (863) 259-44-04,
e-mail: skzd.rzd.ru

Information about the authors

Chernomazov Alexander Vladimirovich
Chief Engineer of the North Caucasus
Railway (a branch of Russian Railways),
Tel. 8 (863) 259-44-04,
e-mail: skzd.rzd.ru

Научное издание

**ТРУДЫ
Ростовского государственного университета
путей сообщения**

Научно-технический журнал

№ 4 (73)
2025

Полнотекстовая версия статей находится в открытом доступе на сайте
Российской научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
Научной электронной библиотеки «КиберЛенинка» <https://cyberleninka.ru/>
Журнал обрабатывается в системах индексов научного цитирования
РИНЦ и ScienceIndex

Оригинал-макет журнала подготовлен Т. З. Талахадзе

Подписано в печать 26.12.2025.	Формат 60×84/8.	Бумага офсетная.
Дата выхода в свет 26.12.2025.	Усл. печ. л. 21,86.	Изд. № 67.
Печать офсетная.	Тираж 510 экз.	Заказ 34.
Знак информационной продукции 16+.	Цена свободная.	

Учредитель:
**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)**

Адрес университета, издателя, редакции, типографии:
**344038, Ростовская область, городской округ г. Ростов-на-Дону, г. Ростов-на-Дону,
пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, зд. 2.**
Тел. редакции +7 (863) 272-62-74, факс +7 (863) 255-37-85.
E-mail: nis@rgups.ru