

Главный редактор Д. П. Кононов, д-р техн. наук, доцент
Editor-in-chief D. Kononov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Заместитель главного редактора М. Евстафьев, д-р техн. наук, профессор
Deputy chief editor M. Evstafev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Научный редактор Т. С. Титова, д-р техн. наук, профессор
Scientific Editor T. Titova, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Перевод на английский язык И. Л. Лютомская
English translation Irina L. Lyutomskaya
Литературное редактирование и корректура Л. А. Солодовникова
Editing and proofreading Larisa A. Solodovnikova
Верстка М. В. Цыбульская
Layout Margarita V. Tsybul'skaya

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Издатель

ООО «Медиа-Сервис» по договору № ЭА87426 от 12.01.2026

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Publisher

Media Service LLC № ЭА87426, 12.01.2026

Контакты

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9,
тел.: (812) 457-85-36, e-mail: brni@pgups.ru;
111024, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово,
ул. Авиамоторная, д. 50, стр. 2, помещ. 29/2

Contacts

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9,
+7 (812) 457-85-36, e-mail: brni@pgups.ru;
111024, Moscow, inner ter. city municipal district Lefortovo,
Aviamotornaya st., 50 building 2, room 29/2

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ЭЛ № ФС 77-45490 от 22.06.2011 выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Mass media registration certificate number

ЭЛ No. ФС 77-45490 dd. 22.06.2011 issued by the The Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

The Journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI)

Журнал имеет институт рецензирования

The Journal has the Peer-review division

Журнал распространяется через интернет без ограничений и по адресно-целевой подписке через редакцию

The Journal is distributed via Internet for free and by subscription via Editorial office

Минимальные системные требования

Тип компьютера, процессор, сопроцессор, частота: Pentium IV и выше; оперативная память (RAM): 256 Мб и выше; необходимо на винчестере: не менее 64 Мб; ОС MacOS, Windows (XP, Vista, 7); видеосистема: встроенная; дополнительное ПО: Adobe Reader версия от 7.X или аналог. Защита от незаконного распространения: реализуется встроенными средствами Adobe Acrobat

Дата выпуска 27.03.2026.

Формат 60×84/16. Уч.-изд. л. 13,31

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

INTERNATIONAL EDITORIAL

Валинский Олег Сергеевич, канд. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель Совета
Oleg Valinskiy, PhD Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

Хамидов Отабек Рустамович, д-р техн. наук, доцент, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан
Otabek Khamidov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Tashkent State Technical University, Tashkent, The Republic of Uzbekistan

Вэйли Ли, профессор, Институт электрических машин и приборов, Пекинский университет Цзяотун, Пекин, Китай

Weili Li, PhD Degree and Professor, School of Electrical Engineering, Director of Institute of Electrical Machinery and Appliances, Beijing Jiaotong University, Beijing, China

Ли Фушэн, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай

Li Fusheng, PhD, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou, China

Поляк Милош, профессор, Жилинский университет, Жилин, Словацкая Республика

Milos Poliak, Ing. PhD, Professor, University of Zilina, Zilina, Slovak Republic

Стыскала Витезслав, профессор, Остравский технический университет, Острава, Чешская Республика
Vitezslav Styskala, PhD, Associate Professor, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic

Чжан Чжунъян, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай

Zhang Zhongyang, University Degree, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Professor, Secretary of the School of Locomotives and Rolling Stock, Zhengzhou, China

Бельтюков Владимир Петрович, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Vladimir Belytyukov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Блашко Людмила Сергеевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Liudmila Blazhko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Бороненко Юрий Павлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Yuriy Boronenko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Грачев Владимир Васильевич, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Vladimir Grachev, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Грищенко Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Alexander Grishchenko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Дудкин Евгений Павлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Evgeniy Dudkin, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Евстафьев Андрей Михайлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Andrey Evstafev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Журавлева Наталья Александровна, д-р экон. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Natalya Zhuravleva, D. Econ. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Ким Константин Константинович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Konstantin Kim, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Колпахчян Павел Григорьевич, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Pavel Kolpakhchyan, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Лapidус Лариса Владимировна, д-р экон. наук, профессор, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
Larisa Lapidus, D. Econ. Sci., Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Никитин Александр Борисович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Alexander Nikitin, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Никитин Виктор Валерьевич, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Victor Nikitin, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Пудовиков Олег Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, РУТ, Москва, Россия
Oleg Pudovikov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Russian University of Transport, Moscow, Russia

Рачек Светлана Витальевна, д-р экон. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
Svetlana Rachek, D. Econ. Sci., Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

Титова Таммила Семеновна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Tamila Titova, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Штыков Валерий Иванович, член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Valerij Shtykov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ, ПРЕДЛАГАЕМЫМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «БЮЛЛЕТЕНЬ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

1.1. Тема и содержание представляемой для публикации статьи должны соответствовать профилю журнала, обладать научной новизной и представлять интерес для специалистов.

1.2. Статьи, ранее опубликованные или переданные в другие издания, в журнал не принимаются.

1.3. Результаты исследований должны соответствовать одному из научных направлений: «Транспортные системы», «Энергетика и электротехника», «Экономика».

1.4. Нижеперечисленные материалы предоставляются в электронном виде в одном архивном файле (zip или rar):

Файл 1 — рукопись научной статьи в формате MS Word.

Файл 2 — первая страница рукописи, подписанная автором (авторами).

Файл 3 — согласие на обработку персональных данных, заверенное личной подписью, в сканированном виде.

Файл 4 — информация об авторах:

- Ф. И. О. полностью;
- дата рождения;
- место работы, должность;
- ученая степень и звание;
- паспортные данные (серия, номер, кем и когда выдан);
- e-mail, телефон;
- адрес.

Файл 5 — название статьи, аннотация, ключевые слова, библиографический список на английском языке в формате MS Word.

Файл 6 — экспертное заключение о возможности опубликования рукописи в открытом доступе, заверенное по месту обучения или работы, в сканированном виде.

Файл 7 — рецензия научного руководителя (для студентов — исследователей, магистров, аспирантов и соискателей ученых степеней).

Файл 8 — лицензионный договор.

1.5. Все рукописи проходят рецензирование (внешняя экспертная оценка). В случае отрицательного отзыва рукопись возвращается автору на доработку. В случае повторного отрицательного отзыва статья отклоняется. После получения положительной рецензии с рекомендацией к публикации рукопись передается в издательство и проходит предпечатную подготовку.

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТУ

Объем статьи — не менее 8 и не более 15 страниц: при наборе текста в формате Word, кегль 14, интервал одинарный. На первой странице рукописи помещаются УДК, фамилии авторов (с указанием места обучения или работы), название статьи, аннотация и ключевые слова. Текст должен содержать введение, озаглавленные разделы, заключение.

Формулы должны быть набраны шрифтом Times New Roman в тексте статьи или в программе Math Type. Буквы латинского алфавита в тексте и формулах набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов — обычным шрифтом. Нумеровать нужно только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Формат страницы — А4; каждое поле — 2,5 см; абзацный отступ — 1 см; размер шрифта 14, выравнивание по левому краю; автор (авторы) с указанием места обучения или работы — размер шрифта 14, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; название рукописи — размер шрифта 14, строчные буквы, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; аннотация, ключевые слова — размер шрифта 12, выравнивание по ширине.

Требуемый объем **аннотации** — 200–250 слов.

В аннотации должны быть указаны цель, методы, результаты, практическая значимость работы.

Библиографический список приводится в конце статьи и составляется по мере упоминания работ в тексте. Ссылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках.

Рисунки, графики и таблицы должны иметь номер и заголовок (размер шрифта 12, выравнивание по центру). **Внимание!** Рисунки и формулы не должны быть сканированными!

Фотографии предоставляются в двух вариантах: в тексте статьи и в виде отдельных файлов TIFF и JPEG без сжатия. Название файла должно соответствовать подрисовочной подписи. Сканирование материалов из альбомов, журналов, буклетов, газет и книг влечет за собой сильное понижение качества изображения. Используйте функцию Descrreen. Если вы сканируете фото самостоятельно, выставляйте разрешение 300 dpi (большее не имеет смысла, меньшее приведет к понижению качества). То же самое касается рисунков, графиков и диаграмм, созданных в CorelDraw и Illustrator. Помещайте в файл в формате Word рисунки только в качестве preview-версии, не забывая прилагать отдельно исходники.

Важная информация. Настоящие требования могут быть изменены без оповещения авторов. Неисключительные права на все материалы, опубликованные на сайте журнала, кроме оговоренных случаев, принадлежат ФГБОУ ВО ПГУПС. Все материалы, авторские права на которые принадлежат ФГБОУ ВО ПГУПС, могут быть перепечатаны при наличии письменного разрешения ФГБОУ ВО ПГУПС. Требуется предварительное согласие на перепечатку со стороны издателя.

Содержание

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

М. А. Шрайбер, В. В. Грачев, А. В. Грищенко	3D-модель напряженного состояния изоляции тяговых электродвигателей локомотивов	7
Д. Г. Бейн, Л. В. Цыганская	Топологическая оптимизация поддерживающей балки пола полувагона с глухим кузовом	17
Д. А. Колотай, Е. В. Опарина	Совершенствование кожуха зубчатых передач для электроподвижного состава безэкипировочного применения	34
А. Ю. Антонов, Л. С. Блажко	О физическом смысле коэффициентов, учитывающих величину приведенной массы железнодорожного пути, в расчете пути на прочность	45
И. А. Вишняков, Д. Г. Евсеев	Сравнительный анализ причин внеплановых ремонтов пассажирских вагонов	58
Ц. Шэнь, А. Е. Цаплин	Исследование неразрушающего контроля осей колесных пар подвижного состава на основе модели	67
И. Ю. Ермоленко, Д. А. Ковенькин	Особенности влияния кинематики вагона на сход подвижного состава при движении по стрелочным переводам	81
А. Н. Сычугов, В. Д. Быльцева, А. В. Курков	Анализ технических характеристик тяговых аккумуляторных батарей городского наземного электрического транспорта	99
И. Н. Мунзаров, А. А. Воробьев, А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин, В. С. Майоров	Численные исследования напряженно-деформированного состояния элементов стреловых самоходных кранов на железнодорожном ходу в трехмерной нестационарной постановке задачи	112
Т. С. Титова, П. Г. Колпахчян, А. С. Володина	Система регулирования асинхронного тягового двигателя скоростного поезда	128
А. А. Беляев	Многоклассовая классификация технического состояния дизельного двигателя тепловоза по вейвлет-признакам вибросигналов методами машинного обучения	142
Ю. П. Бороненко, А. А. Комайданов	Способ определения основного сопротивления движению грузового вагона при проведении ходовых тормозных испытаний	154
Д. С. Аскендерова, Е. А. Кайкина, А. В. Новичихин	Методика распределения порожних контейнеропотоков в условиях транспортно-логистического центра	174

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

В. Ф. Лапшин	Анализ тепловых процессов внутри охлаждаемого надземного водовода с теплоизоляцией	185
Н. В. Зиновьев, П. В. Харламов, Я. К. Склифус	Лабораторные исследования опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для сравнения трибологических свойств и ресурса к истиранию	196

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Л. Ф. Казанская, А. Н. Федорова, Ю. И. Макаров, И. А. Латыпова	Оптимизация управления цепочками создания ценности на основе системы аудита поставщиков	208
Е. М. Волкова	Оценка результативности отраслевого рынка городских пассажирских перевозок	218

Contents

PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

M. A. Shrajber, V. V. Grachev, A. V. Grischenko	3D-model of the stress state of the locomotive traction motor insulation	7
D. G. Bein, L. V. Tsyganskaya	Topological optimization of the supporting beam of the floor of a gondola car with a solid body	17
D. A. Kolotay, E. V. Oparina	Improvement of gearbox housing for unequipped electric rolling stock	34
A. Yu. Antonov, L. S. Blazhko	Physical interpretation of the railway track's equivalent mass coefficients in track strength calculations	45
I. A. Vishnyakov, D. G. Evseev	Comparative analysis of the causes of unscheduled repairs of passenger carriages	58
Jieyi Shen, A. E. Tsaplin	Study of non-destructive testing of rolling stock wheelset axles based on the model	67
I. Yu. Ermolenko, D. A. Kovenkin	Specific features of the railcar kinematics causing rolling stock derailment when traversing turnouts	81
A. N. Sychugov, V. D. Byltseva, A. V. Kurkov	Analysis of traction battery performance in urban electric transport	99
I. N. Munzarov, A. A. Vorobyov, A. S. Vatayev, Ya. S. Vatulin, V. S. Mayorov	Numerically modelled stress-strain state of rail-mounted jib crane within a three-dimensional non-stationary framework	112
T. S. Titova, P. G. Kolpakhch'yan, A. S. Volodina	Control system for an induction traction motor in high-speed trains	128
A. A. Beliaev	Multiclass classification of the technical condition of a diesel locomotive engine based on wavelet features of vibration signals using machine learning methods	142
Yu. P. Boronenko, A. A. Komaidanov	Method for determining the primary obstacle to motion of freight wagons during running brake tests	154
D. S. Askenderova, E. A. Kaikina, A. V. Novitchihin	Methodology for distributing empty container flows within a transport and logistics center	174

GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

V. F. Lapshin	Analysis of heat transfer dynamics within surface-mounted insulated cooled water pipeline	185
N. V. Zinoviev, P. V. Kharlamov, Ya. K. Sklifus	Laboratory studies of prototype nanostructured lubricants for comparison of tribological properties and abrasion resistance	196

GOVERNANCE AND ECONOMICS

L. F. Kazanskaya, A. N. Fedorova, Yu. I. Makarov, I. A. Latypova	Optimization of value chain management based on a supplier audit system	208
E. M. Volkova	The performance assessment of urban passenger transportation market	218

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.423.31

3D-модель напряженного состояния изоляции тяговых электродвигателей локомотивов

М. А. Шрайбер, В. В. Грачев, А. В. Грищенко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шрайбер М. А., Грачев В. В., Грищенко А. В. 3D-модель напряженного состояния изоляции тяговых электродвигателей локомотивов // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 7–16. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-7-16

Аннотация

Цель: оценить уровень термомеханических напряжений в изоляционном материале тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотивов. **Методы:** анализ термомеханических напряжений проводился с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе SolidWorks 2010 для детального изучения напряженно-деформированного состояния изоляционного материала на всех этапах нагружения, обеспечивая высокую точность и надежность результатов. **Результаты:** термомеханические напряжения оказывают значительное влияние на динамическое термическое старение изоляционной системы обмоток. Они вызывают усталостные разрушения, которые приводят к деградации изоляционных свойств и снижению надежности ТЭД. На основе полученных данных разработана методика численного моделирования, позволяющая точно предсказывать напряженно-деформированное состояние изоляционного материала на различных этапах нагружения. Это обеспечивает возможность проектирования и оптимизации конструкций ТЭД с учетом реальных эксплуатационных условий. Разработанная методика может быть применена для оценки термомеханических напряжений в пропиточных материалах изоляции ТЭД и аналогичных конструкциях, что расширяет ее практическое применение и значимость. Это представляет собой важный шаг в понимании механизмов старения изоляции ТЭД и разработке методов повышения их надежности и долговечности. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы для создания новых технологий и инженерных решений, которые значительно улучшат эксплуатационные характеристики локомотивов, снижая затраты на их обслуживание и повышая безопасность перевозок.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель локомотива, тепловые процессы электрических машин, старение изоляции, термомеханические напряжения, надежность электрических машин

Введение

В процессе эксплуатации изоляция ТЭД подвергается динамическим нагрузкам, вызванным колебаниями тока, изменяющимися от минимальных до максимальных значений. Эти изменения вызывают температурный градиент между медным проводником и стальным сердечником, что приводит к термоциклированию

обмоток [1]. Термомеханическая усталость, обусловленная циклическими изменениями температуры, является дополнительным механизмом повреждения изоляции обмоток [2]. Это существенно снижает надежность ТЭД, а также увеличивает затраты на техническое обслуживание и ремонт.

Изоляционный материал обмоток ТЭД представляет собой сложную композицию разнородных компонентов, обладающих уникальными физико-механическими свойствами. Неоднородность структуры изоляции и ее свойств создает значительные трудности для анализа напряженно-деформированного состояния изоляции [3].

С развитием современных ТЭД, характеризующихся высокой удельной мощностью и улучшенными эксплуатационными свойствами, возрастает необходимость исследования термомеханических напряжений в материале изоляции, возникающих вследствие теплового расширения. Это критически важно для создания эффективных изоляционных систем, обеспечивающих надежную и долговечную работу перспективных ТЭД.

Исследования показывают прямую зависимость между температурными напряжениями и продолжительностью службы материалов [4, 5]. Для ТЭД предельно допустимые температуры нагрева обмоток строго регламентируются на основе длительных эксплуатационных испытаний. В течение суток температура обмоток ТЭД может изменяться в зависимости от температуры окружающей среды до 120–160 °С [6].

Обычно, когда мы исследуем внутренние напряжения в однородных материалах, мы хотим узнать, сможет ли объект выдержать определенную нагрузку. Если напряжение превышает предел прочности материала на растяжение, происходит разрушение. Однако в случае с изоляцией ТЭД это не совсем так. Если в изоляции появляется термомеханическое повреждение, это еще не значит, что ТЭД неисправен. К отказу ТЭД приводят другие факторы, связанные с повреждением изоляции. Эти факторы могут быть вызваны попаданием в поврежденное место атмосферной влаги, продуктов износа ТЭД и подвижного состава, а также дорожной пыли [7].

Подбор изоляционных материалов должен учитывать не только их электрические, но и термические, а также механические характеристики. Только так можно обеспечить надежную работу ТЭД в условиях, где каждый сбой может привести к серьезным последствиям. Это критически важно для обеспечения безопасности и эффективности железнодорожного транспорта, где надежность и долговечность оборудования играют ключевую роль [8, 9].

Математическая модель

Все материалы, которые используются для изоляции в современных электрических машинах промышленного назначения, в той или иной степени проявляют свойства, характерные для вязкоупругих материалов. Вязкоупругий материал

сочетает в себе как упругие, так и вязкие характеристики. Его деформация зависит от температуры [10].

В настоящей работе были использованы численные данные по свойствам изоляционных материалов, которые приведены в [11]. Эти данные позволили оценить не только свойства материала изоляции, но и его сопротивление сдвигу и поперечному отрыву. Оказалось, что большинство волокнистых материалов обладают существенной анизотропией упругих и прочностных свойств и наряду с рекордными свойствами при растяжении вдоль волокон плохо сопротивляются межслойному сдвигу и поперечному отрыву.

Если температура распределяется равномерно по всей длине объекта, то он будет подвергаться равномерной тепловой деформации во всех направлениях.

Геометрия обмотки, использованная в исследовании термомеханических процессов в данном случае: принята двухпроводная обмотка, проводники которой имеют прямоугольное поперечное сечение, изоляция представлена монолитным материалом, как показано на рис. 1.

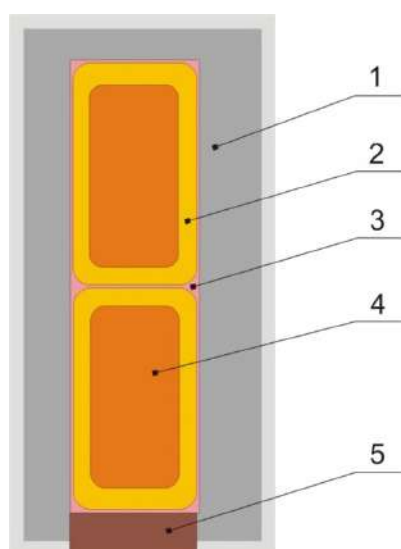


Рис. 1. Расчетная схема паза:

1 — клин, 2 — изоляция, 3 — проводник, 4 — пропиточный материал, 5 — сердечник

Для описания поведения реального материала изоляции можно использовать обобщенную модель [12]. Через любую точку упругого тела, подверженного действию внешней нагрузки, можно провести бесчисленное множество сечений (площадок), по которым в общем случае будут действовать как нормальные, так и касательные напряжения. При этом величина и направление указанных напряжений в каждом конкретном случае будут зависеть от ориентации площадки. Одним из результатов, ожидаемых от моделирования, является определение доминирующих напряжений, нормальных или касательных. В случае простой однонаправленно нагруженной площадки внешняя нагрузка прикладывается по осям x , y или z (рис. 2).

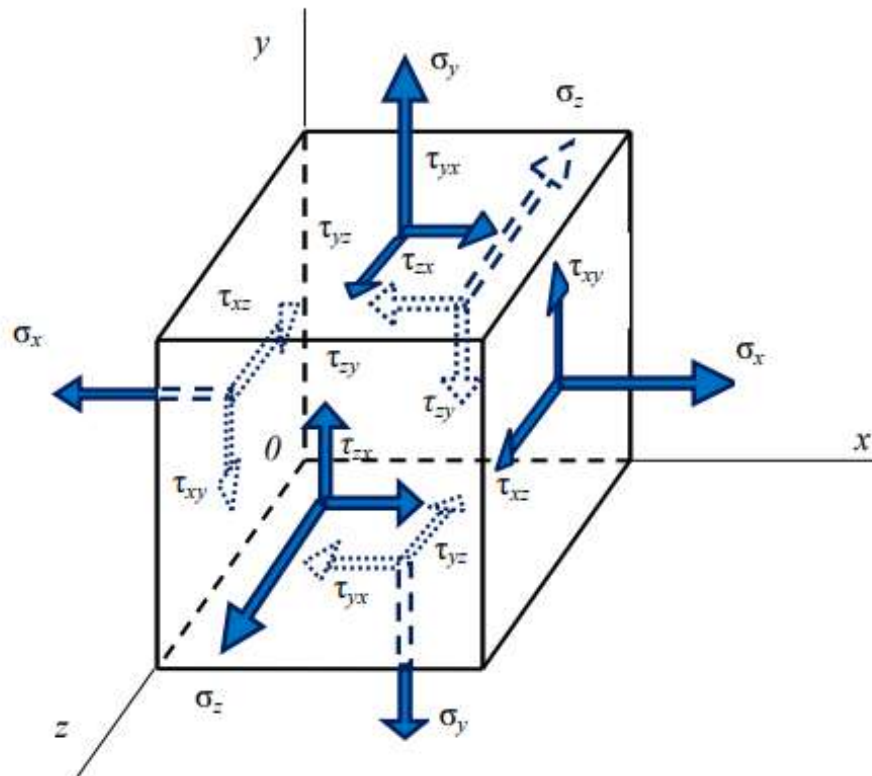


Рис. 2. Пространственное напряженное состояние материала изоляции

В общем случае имеется шесть компонентов напряжения, три из которых представляют нормальные напряжения σ_x , σ_y , σ_z в направлении осей x , y , z , а три других — касательные напряжения τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} . Касательные напряжения — это напряжения, параллельные поперечному сечению образца.

К каждой поверхности приложено одно нормальное и два касательных напряжения сдвига, а нижние индексы обозначают направление, на которое указывает напряжение, и поверхность, параллельно которой приложено касательное напряжение. Например, возьмем X -поверхность. На ней изображено три напряжения: одно нормальное напряжение в x -направлении и σ_x , параллельно этому поперечному сечению действуют два касательных напряжения τ_{xy} и τ_{xz} . Первый индекс обозначает поверхность, которой они параллельны, а второй — направление, на которое они указывают. Так, например, τ_{xy} — это касательное напряжение, параллельное поверхности x и направленное в сторону y . Для того чтобы трехмерный куб находился в равновесном состоянии, необходимо обязательное выполнение следующего условия: $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, в противном случае он будет вращаться [12].

В настоящей работе термомеханические напряжения в изоляции обмоток ТЭД исследованы численно с использованием программного обеспечения SolidWorks 2010. В качестве тестового примера в исследовании используется коллекторный ТЭД типа ЭД-118А [13].

На рис. 3 приведены результаты моделирования нормальных напряжений, возникающих в материалах обмотки статора при изменении температуры медного проводника на $\Delta T = 100^\circ\text{C}$. На этом температурном пике нормальные напряжения максимальны, поэтому расчет выполняется для данного значения.

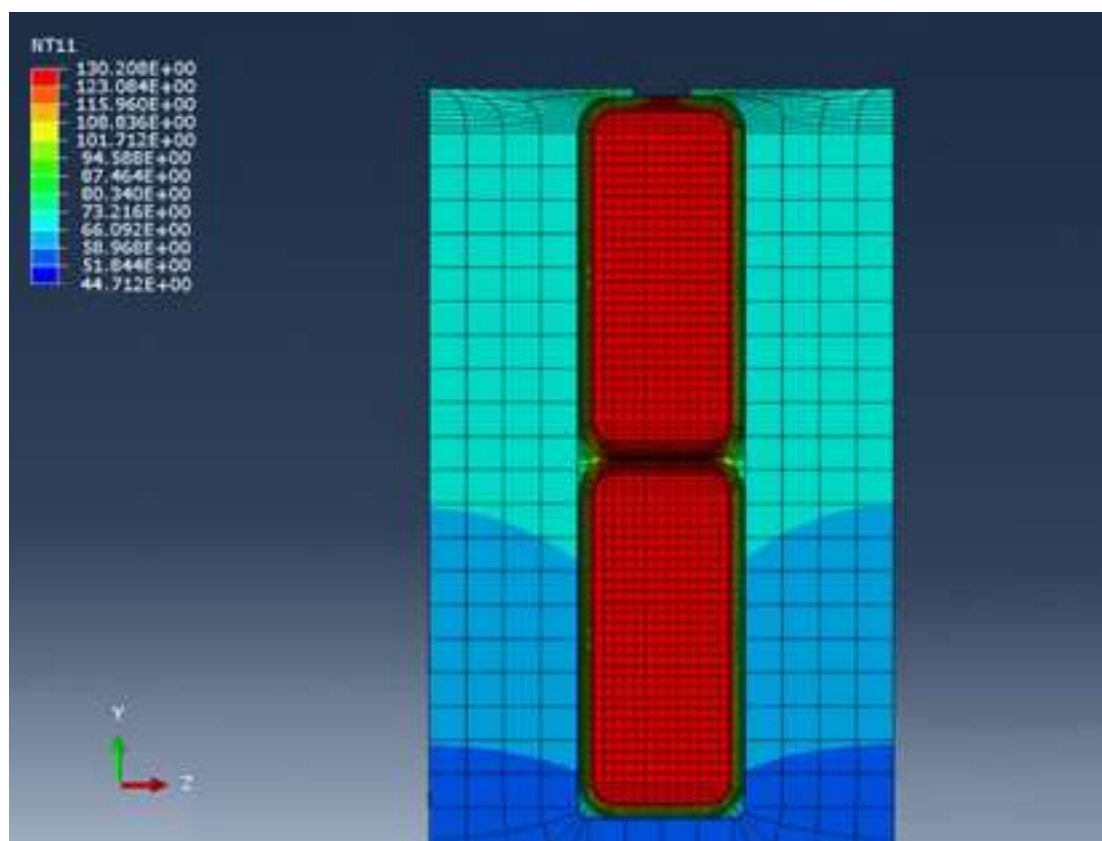


Рис. 3. Распределение нормальных напряжений в медном проводнике и материале изоляции

Изображение несколько увеличено, и на нем представлены только наиболее критические области, в которых возникают максимальные нормальные напряжения. Области с максимальными значениями нормальных напряжений выделены красным цветом. Результаты расчета значений напряжений в материале обмотки, представленные на рис. 3, показаны в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчета напряжений в материалах обмотки

Материал	σ_z , МПа	σ_y , МПа
Медь	59,8	5,7
Изоляция	33,7	2,4
Сердечник	86,4	6,9

Области зубца статора вблизи обмоток испытывают более высокие напряжения из-за разницы в коэффициентах теплового расширения железа и материала изоляции в обмотках. Напряжение больше сконцентрировано в вершине зуба и медном проводнике поблизости из-за деформации, вызванной тепловым расширением.

Из рис. 3 видно, что проводник на внешнем слое испытывает более высокое напряжение по сравнению со средним слоем. Вероятно, это связано с тем, что медный проводник симметрично окружен пропиточным составом. Поэтому расширение, вызванное нагревом, симметрично распределяется вокруг проводников в средних слоях. Однако во внутреннем и внешнем слоях расширение несимметрично, поскольку внутренний слой изоляции расположен близко к проводнику и подвергается воздействию более высокой температуры, а внешний слой контактирует с материалом сердечника, который имеет несколько меньшую температуру.

Результаты моделирования

В табл. 2 приведены общие результаты расчета термомеханических напряжений в пазах ТЭД при изменении температуры $\Delta T = 100^\circ\text{C}$. Здесь приведены максимальные амплитуды каждого из компонентов напряжений. Перечисленные значения представляют собой напряжения, которые вычисляются во время моделирования при достижении максимального приращения температуры. Максимальные нормальные напряжения приходятся на сердечник статора из-за острых углов и высокого модуля упругости. Преобладающими напряжениями, воздействующими на изоляцию проводника, являются касательные напряжения сдвига.

ТАБЛИЦА 2. Максимальные значения напряжений в элементах обмотки ТЭД

	σ_x , МПа	σ_y , МПа	σ_z , МПа	τ_{xy} , МПа	τ_{xz} , МПа	τ_{yz} , МПа
Проводник	39,8	5,7	59,8	6,2	13,9	11,5
Изоляция проводника	17,2	2,4	33,7	4,8	5,7	3,7
Корпусная изоляция	18,5	3,8	37,1	3,6	3,9	2,7
Сердечник статора	82,3	6,9	86,4	5,6	6,1	4,0
Пропитка	18,8	3,4	35,7	3,4	3,5	2,9

Распределение термических напряжений в изоляции крайне неоднородно как в верхней, так и в нижней части паза. Это происходит из-за взаимного влияния проводников, что создает сложные условия для распределения тепла. Максимальные значения термических напряжений представляют наибольший практический

интерес, поскольку их превышение может привести к серьезным повреждениям изоляции. Такие повреждения могут значительно снизить эффективность работы ТЭД и даже вызвать аварийные ситуации.

Выводы

1. Представлена простая модель для оценки межфазных термических напряжений в материале изоляции. В частности, обнаружено, что межфазные касательные и нормальные напряжения, предсказанные настоящей моделью, достаточно хорошо согласуются с известными численными решениями.

2. Проведено численное моделирование материала изоляции с целью изучения и минимизации термических напряжений с использованием вязкоупругой модели. Проведенный анализ позволил лучше понять поведение напряжений в зависимости от изменений температуры обмотки.

3. Различие коэффициентов теплового расширения составляющих обмотки вызывает напряжения сдвига, сжатия и растяжения в материале изоляции ТЭД локомотивов. В подавляющем большинстве случаев перечисленные напряжения имеют циклический знакопеременный характер. Наиболее опасными являются напряжения сдвига, которые ослабляют связь между слоями материала изоляции и могут привести к появлению трещин и расслоений.

Список источников

1. Попов А. А., Логинова Е. Ю. Результаты экспериментального и расчетного определения температур обмоток тягового электродвигателя электровоза // Вестник ВНИИЖТ. 1999. № 6. С. 34–39.

2. Влияние климатического старения на характеристики упругости и прочности полимерных композитных материалов / В. Ф. Кутьинов [и др.] // Ученые записки ЦАГИ. 2006. № 4. С. 54–64.

3. Оценка остаточного ресурса изоляции погружного электродвигателя установок электрических центробежных насосов добычи нефти при воздействиях импульсных перенапряжений / В. В. Сушков [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 10. С. 74–80

4. Исмаилов Ш. К. Электрическая прочность изоляции электрических машин локомотивов: монография. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2003. 272 с.

5. Odegard G., Bandyopadhyay A. Physical aging of epoxy polymers and their composites // Polymer Physics, 2011, vol. 49, iss. 24, pp. 1695–1716.

6. Экспериментальные исследования теплового состояния коллектора ТЭД / А. В. Грищенко [и др.] // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век: сборник материалов VI Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС А. В. Плакса. СПб., 2018. С. 124–129.

7. Грачев В. В., Грищенко А. В., Шрайбер М. А. Методика оценки степени увлажнения изоляции тяговых электродвигателей тепловозов // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 4. С. 47–56.
8. Устройство и ремонт электровозов и электропоездов: учебник / А. В. Грищенко [и др.]; под ред. А. В. Грищенко. М.: Академия, 2010. 320 с.
9. Корицкий Ю. В., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Справочник по электротехническим материалам. Т. 1. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1986. 368 с.
10. Пак В. М., Трубачев С. Г. Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 2007. 416 с.
11. Алиев И. И., Калганова С. Г. Электротехнические материалы и изделия. М.: РадиоСофт, 2005. 329 с.
12. Тимошенко С. П. Механика материалов: учебник для вузов. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2002. 672 с.
13. Грищенко А. В., Козаченко Е. В. Новые электрические машины локомотивов: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. 271 с.

Дата поступления: 06.11.2025

Решение о публикации: 09.02.2026

Контактная информация:

ШРАЙБЕР Марина Александровна — канд. техн. наук, доцент; goshapti4ka@yandex.ru

ГРАЧЕВ Владимир Васильевич — д-р техн. наук, профессор; lt@pgups.ru

ГРИЩЕНКО Александр Васильевич — д-р техн. наук, профессор; lt@pgups.ru

3D model of the stress-strain state of the locomotive traction electric motor insulation

M. A. Shrayber, V. V. Grachev, A. V. Grischenko

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Shrayber M.A., Grachev V.V., Grishchenko A.V.* 3D model of the stress-strain state of the locomotive traction electric motor insulation // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 7–16. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-7-16. (In Russian)

Abstract

Objective: to quantify thermomechanical stresses in the insulation of locomotive traction electric motors (TED). **Methods:** thermomechanical stress analysis was performed using the finite element method (FEM) within the SolidWorks 2010 environment, enabling a detailed evaluation of the insulation material's stress-

strain state across all loading stages while ensuring high accuracy and reliability. **Results:** thermomechanical stresses significantly accelerate dynamic thermal aging of the winding insulation provoking fatigue damage that degrades insulating properties and diminishes TED reliability. From these findings, a numerical modelling technique was developed to accurately predict the insulation material's stress-strain behavior under various loading conditions. This approach enables the design and optimization of TED structures under actual operating conditions. The developed methodology can be applied to assess thermomechanical stresses in treated insulation materials associated with TEDs and analogous structures, thereby broadening its practical applicability and significance. It constitutes an important advance in elucidating the aging mechanisms of TED insulation and in devising measures to enhance their reliability and service life. **Practical importance:** the findings can guide the creation of innovative technologies and engineering solutions that will significantly improve locomotive performance, reduce maintenance costs and increase transportation safety.

Keywords: locomotive traction electric motor, thermal processes of electric machines, insulation aging, thermomechanical stresses, and reliability of electric machines

References

1. Popov A. A., Loginova E. Yu. Rezul'taty eksperimental'nogo i raschetnogo opredeleniya temperatur obmotok tyagovogo elektrodvigatelya elektrovoza // Vestnik VNIIZhT. 1999. No. 6. S. 34–39. (In Russian)
2. Vliyanie klimaticheskogo stareniya na kharakteristiki uprugosti i prochnosti polimernykh kompozitnykh materialov / V. F. Kut'inov [i dr.] // Uchenye zapiski TsAGI. 2006. No. 4. S. 54–64. (In Russian)
3. Otsenka ostatochnogo resursa izolyatsii pogruzhnogo elektrodvigatelya ustanovok elektricheskikh tsentrobezhnykh nasosov dobychi nefi pri vozdeystviyakh impul'snykh perenapryazhenij / V. V. Sushkov [i dr.] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2017. T. 328, no. 10. S. 74–80. (In Russian)
4. Ismailov Sh. K. Elektricheskaya prochnost' izolyatsii elektricheskikh mashin lokomotivov: monografiya. Omsk: Omskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya, 2003. 272 s. (In Russian)
5. Odegard G., Bandyopadhyay A. Physical aging of epoxy polymers and their composites // Polymer Physics. 2011. Vol. 49, iss. 24. Pp. 1695–1716.
6. Eksperimental'nye issledovaniya teplovogo sostoyaniya kollektora TED / A. V. Grishchenko [i dr.] // Lokomotivy. Elektricheskij transport. XXI vek: sbornik materialov VI Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoj 90-letiyu so dnya rozhdeniya doktora tekhnicheskikh nauk, professora kafedry «Elektricheskaya tyaga» PGUPS A. V. Plaksa. SPb., 2018. S. 124–129. (In Russian)
7. Grachev V. V., Grishchenko A. V., Shrajber M. A. Metodika otsenki stepeni uvlazhneniya izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelej teplovozov // Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij. 2021. No. 4. S. 47–56. (In Russian)
8. Ustrojstvo i remont elektrovozov i elektropoezdov: uchebnik / A. V. Grishchenko [i dr.]; pod red. A. V. Grishchenko. M.: Akademiya, 2010. 320 s. (In Russian)
9. Koritskij Yu. V., Pasyukov V. V., Tareev B. M. Spravochnik po elektrotekhnicheskim materialam. T. 1. 3-e izd. M.: Energoatomizdat, 1986. 368 s. (In Russian)

10. Pak V.M., Trubachev S.G. *Novye materialy i sistemy izolyatsii vysokovol'tnykh elektricheskikh mashin*. M.: Energoatomizdat, 2007. 416 s. (In Russian)

11. Aliev I.I., Kalganova S.G. *Elektrotekhnicheskie materialy i izdeliya*. M.: RadioSoft, 2005. 329 s. (In Russian)

12. Timoshenko S.P. *Mekhanika materialov: uchebnik dlya vuzov*. 2-e izd., ster. SPb.: Lan', 2002. 672 s. (In Russian)

13. Grishchenko A. V., Kozachenko E. V. *Novye elektricheskie mashiny lokomotivov: uchebnoe posobie dlya vuzov zh.-d. transporta*. M.: GOU "Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte", 2008. 271 s. (In Russian)

Received: 06.11.2025

Accepted: 09.02.2026

Author's information:

Marina A. SHRAJBER — PhD in Engineering, Associate Professor; goshapti4ka@yandex.ru

Vladimir V. GRACHEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; lt@pgups.ru

Alexander V. GRISCHENKO — Dr. Sci. in Engineering, Professor; lt@pgups.ru

УДК 629.463.65:629.023

Топологическая оптимизация поддерживающей балки пола полувагона с глухим кузовом

Д. Г. Бейн¹, Л. В. Цыганская²

¹ АО «НВЦ «Вагоны», Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 22, литера М, 1-й этаж, пом. 5н

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Бейн Д. Г., Цыганская Л. В. Топологическая оптимизация поддерживающей балки пола полувагона с глухим кузовом // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 17–33. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-17-33

Аннотация

Цель: оценка возможности снижения массы тары полувагона с глухим кузовом за счет снижения массы поддерживающих пол сварных балок с применением метода топологической оптимизации конструкции. **Метод:** приведен краткий обзор известных методов параметрической оптимизации. Проведена топологическая оптимизация конструкции сварной поддерживающей балки с использованием метода ESO (Evolutionary Structural Optimization). Оптимизированная конструкция поддерживающей балки была проверена на прочность при действии сочетания расчетных нагрузок по режиму 1в согласно ГОСТ 33211 при действии сжимающей силы 2,5 МН. **Результаты:** применение топологической оптимизации для сварных балок рам грузовых вагонов с ограничением на изменение толщины листов позволяет определить приоритетные направления изменений поперечного сечения балки. При этом после технологической обработки результатов оптимизации можно получить конструкцию балки со сниженной массой относительно исходного варианта, на рассмотренном примере — в 2,4 раза (на 58 %). **Практическая значимость:** показана возможность применения метода топологической оптимизации применительно к решению инженерных задач при проектировании металлоконструкций грузовых вагонов. Предложена конструкция поддерживающей балки, вертикальный лист которой имеет трапецеидальные вырезы, а нижний лист — переменную ширину, что позволило снизить массу балки с сохранением ее прочностных характеристик.

Ключевые слова: полувагон, рама полувагона, прочность, топологическая оптимизация

Введение

Снижение металлоемкости грузовых вагонов является актуальной задачей, решение которой обеспечивает повышение эффективности и снижение стоимости вагона.

В работах [1–4] показана возможность применения высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов в конструкциях грузовых вагонов для снижения массы тары грузовых вагонов. В работе [5] отмечено, что применение новых конструктивных решений, обеспечивающих снижение металлоемкости элементов вагона при условии сохранения требуемых показателей прочности, способно снизить технический коэффициент тары вагона.

Для полувагонов с глухим кузовом снижение коэффициента тары возможно в том числе за счет снижения массы продольных подкрепляющих (поддерживающих) балок пола.

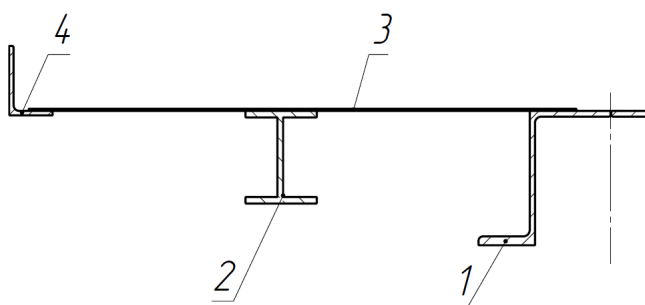
Целью проведенных исследований была оценка возможности снижения массы тары полувагона с глухим кузовом за счет снижения массы поддерживающих пол балок с применением метода топологической оптимизации конструкции.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

- разработка упрощенной конечно-элементной модели поддерживающей балки и проведение оптимизационных расчетов с использованием инструментов топологической оптимизации;
- проведение технологической обработки результатов оптимизации;
- оценка прочности конструкции полувагона с оптимизированными продольными поддерживающими балками при действии нормативных расчетных нагрузок, регламентированных ГОСТ 33211 [6].

Объект исследования — полувагон с глухим кузовом (с линейными размерами универсального полувагона), имеющий продольные поддерживающие балки рамы и настил пола из плоского листа. Схема рамы такого полувагона показана на рис. 1.

Актуальность работы связана как с общей отраслевой тенденцией на создание конструкций вагонов со сниженным коэффициентом тары [1–5], так и с повреждаемостью таких балок в эксплуатации [7] от действий сосредоточенных вертикальных сил (удары ковшом грейдера, падение глыб груза). Пример типового повреждения поддерживающей балки пола полувагона приведен на рис. 2.



1 — хребтовая балка; 2 — поддерживающая балка;
3 — настил пола; 4 — нижняя обвязка



Рис. 2. Повреждение поддерживающей балки полувагона с глухим кузовом (фото Д. Г. Бейна)

Рис. 1. Эскиз поперечного сечения рамы полувагона с глухим кузовом

Материалы и методы

На данный момент известно большое количество методов параметрической оптимизации, которые принято разделять на две категории: поисковые и непоисковые (аналитические) [8].

К аналитическим относятся методы решения экстремальных задач, основанные на применении методов дифференциального и вариационного исчисления. Сложность применения непоисковых методов обусловлена тем, что необходимо выразить функции цели и функции ограничений аналитически через параметры проектирования.

Поисковые методы, основанные на использовании теории математического программирования, условно разделяют на методы направленного и ненаправленного поиска.

Процедура методов направленного поиска представляет собой итерационный процесс, на каждом шаге которого изменяются параметры исходной конструкции. Методы ненаправленного поиска также основаны на использовании итерационных процессов, но при этом уступают в быстродействии методам направленного поиска.

В зависимости от способа назначения изменений параметров на каждой итерации выделяют следующие методы направленного поиска:

- детерминированного направленного поиска;
- направленного случайного поиска;
- покоординатной оптимизации;
- градиентный метод;
- метод возможных направлений;
- метод пересчета;
- линейное и динамическое программирование [9].

Из методов случайного поиска для параметрической оптимизации кузовов вагонов используются генетические алгоритмы (эволюционное моделирование) [10]. В основе указанных алгоритмов лежат принципы эволюции видов живой природы. Генетические алгоритмы позволяют получать рациональные решения как на непрерывных, так и на дискретных множествах параметров проектирования.

Топологическая оптимизация — это метод оптимизации формы, который использует алгоритмические модели для наилучшей компоновки материалов в заданном пользователем пространстве при заданных нагрузках и граничных условиях. Топологическая оптимизация применяется для повышения эффективности конструкции за счет удаления избыточного материала из областей, которые не требуют значительных нагрузок, в том числе для снижения массы [11]. Существует несколько методов топологической оптимизации.

Так как современные инженерные программные комплексы (ПК), такие как ANSYS и Solid Works, обладают необходимым функционалом для решения задач топологии конструкций, применение такого метода оптимизации при решении практических инженерных задач в области грузового вагоностроения становится все более перспективным. Например, в работе [11] рассмотрены подходы к топологической оптимизации конструкции типовой балки для железнодорожного подвижного состава с использованием ANSYS, исследован классический случай консольного нагружения силой. В статье [12] дается общее представление топологической оптимизации для линейно-упругих конструкций и рассматривается решение задач оптимизации топологии конструкций на базе программного комплекса (ПК) ANSYS. Решение задач топологической оптимизации конструкций с использованием программы ANSYS также рассмотрено в работе [13].

В работе [5] отмечено, что применение новых конструктивных решений зачастую усложняет технологию изготовления и ремонта вагона. Однако с учетом внедрения новых технологий изготовления деталей (например, лазерной резки) применение оригинальных технических решений, полученных с помощью топологической оптимизации, может открыть новые конструктивные направления для снижения коэффициента тары и, соответственно, для улучшения технических характеристик железнодорожной техники.

Математическая постановка задачи оптимизации

Применительно к кузовам вагонов задача оптимального проектирования выражается адаптивным функционалом (1) [9]:

$$J = F(J_m + J_n + J_s + J_p) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где J_m — приведенные затраты на конструкционные материалы;

J_n — приведенные затраты на изготовление кузова;

J_s — приведенные затраты на эксплуатацию;

J_p — приведенные затраты на ремонт.

От приведенных затрат на конструкционные материалы J_m зависят приведенные затраты на изготовление конструкции J_n (протяженность сварных швов, количество деталей), затраты на эксплуатацию J_s (стоимость перевозки тары), затраты на ремонт J_p (количество мест концентрации напряжений, прочностные характеристики и надежность конструкции). Приведенные затраты на конструкционные материалы J_m определяются стоимостью материалов C_{M_i} и массой несущих элементов M_i [9]:

$$J_m = \sum_{i=1}^n (C_{M_i} \cdot M_i), \quad (2)$$

где n — число несущих элементов.

Так как стоимость материалов C_{M_i} зависит от массы конструкции, минимальная металлоемкость кузова является предпочтительным критерием. В этом случае функция цели имеет вид:

$$M = \sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot L_i \cdot F_i), \quad (3)$$

где γ — удельный вес материала i -го несущего элемента;

L_i — длина i -го несущего элемента;

F_i — площадь поперечного сечения i -го несущего элемента (для переменных по длине размеров поперечных сечений элемента — эквивалентная площадь).

Соответственно, металлоемкость кузова зависит как от числа несущих элементов n , так и от размеров их поперечных сечений.

Пример топологической оптимизации поддерживающей балки пола полувагона

Исходные данные

В работе [8] отмечено, что для оптимизации несущей системы кузова важно знать, какие нагрузки или их сочетания вызывают максимальные напряжения в несущих элементах. В работах [8] и [14] предложено проводить оптимизационные расчеты поддерживающей балки от нагрузки 50 кН (расчетный режим согласно «Нормам ...» [15]).

Рассмотрим пример топологической оптимизации поддерживающей балки пола полувагона с глухим кузовом с использованием упрощенной расчетной схемы: балка длиной 1750 мм с жестким закреплением по консолям.

На балку действует нагрузка 50 кН, распределенная на площадке 250×250 мм в середине балки. Материал балки — сталь с допускаемыми напряжениями $[\sigma] = 280$ МПа.

Задачи расчета:

- рассчитать по МКЭ на прочность балку исходной конструкции;
- провести топологическую оптимизацию балки с ограничениями на изменение ее толщин;
- провести топологическую оптимизацию балки без ограничений на изменение ее толщин.

Функция цели топологической оптимизации: минимум массы по критерию прочности. В поперечное сечение балки включена часть настила пола с учетом рекомендаций к построению поперечных сечений, приведенных в «Нормах ...» [15].

3D-модель балки с частью настила показана на рис. 3.

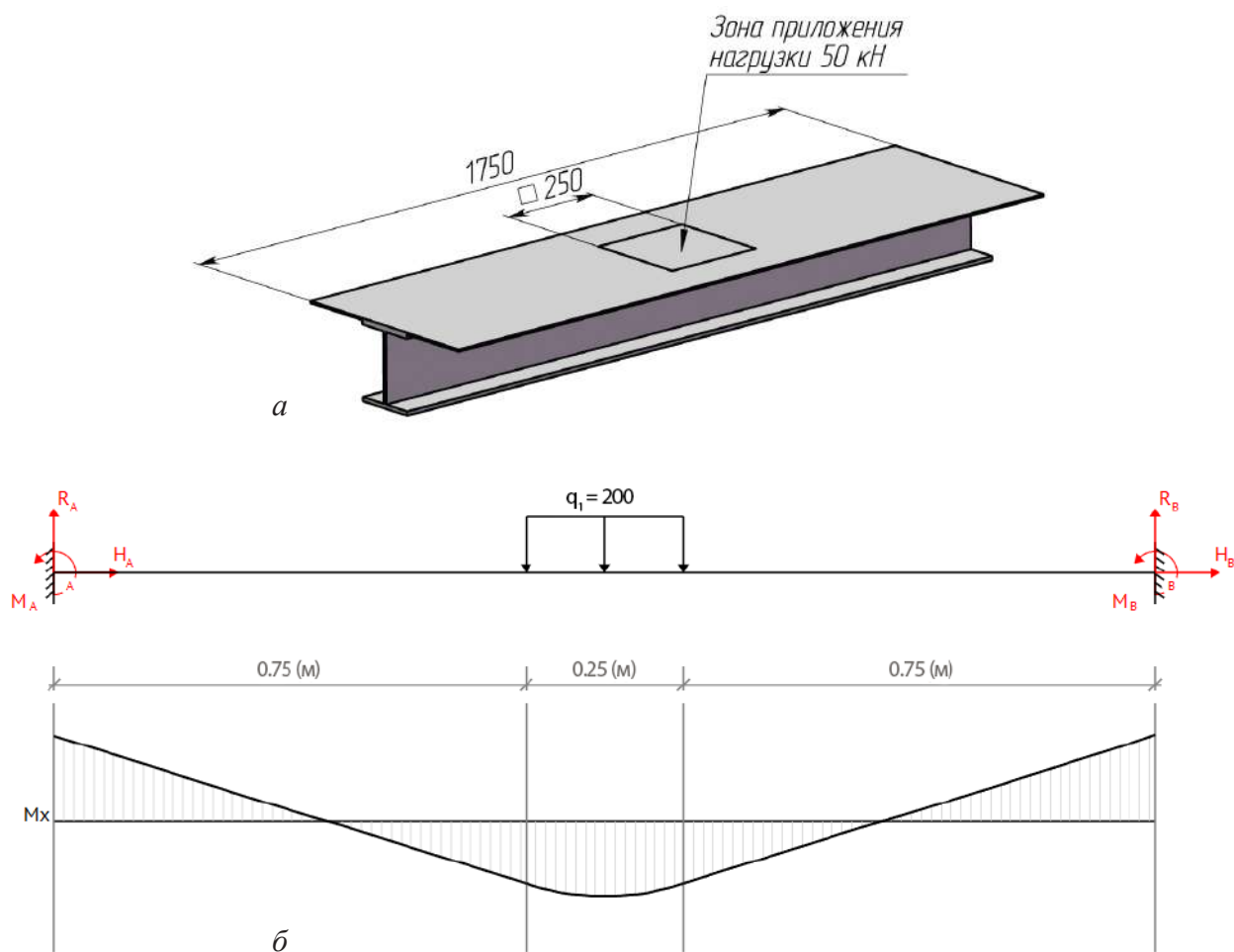


Рис. 3. Упрощенная расчетная схема поддерживающей балки: *a* — исходная 3D-модель; *б* — расчетная схема и эпюра изгибающего момента

Описание расчетной модели

Для моделирования была разработана объемная конечно-элементная модель на основе твердотельной 3D-модели с разбиением на конечно-элементную сетку на основе смешанной кривизны.

Сведения о конечно-элементной сетке:

- максимальный размер элемента: 10,06 мм;
- минимальный размер элемента: 10,06 мм;
- всего узлов: 227 188;
- всего элементов: 119 525.

Были заданы технологические и эксплуатационные ограничения:

- толщина листа настила пола не изменялась;
- толщина стенок и полок двутавра балки: 3 мм min (ограничение по коррозионной стойкости);
- выполнение условия симметричности относительно продольной и поперечной плоскостей симметрии балки.

Расчетная конечно-элементная модель показана на рис. 4.

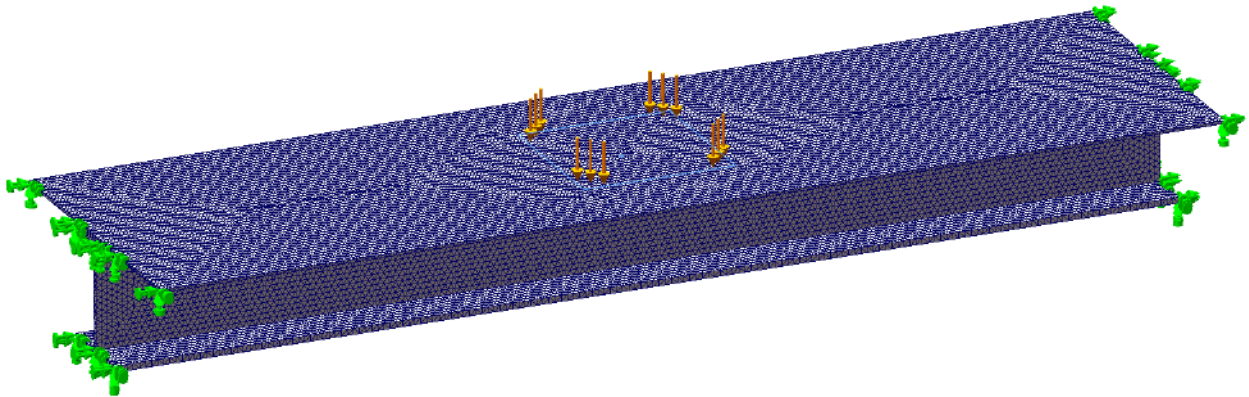
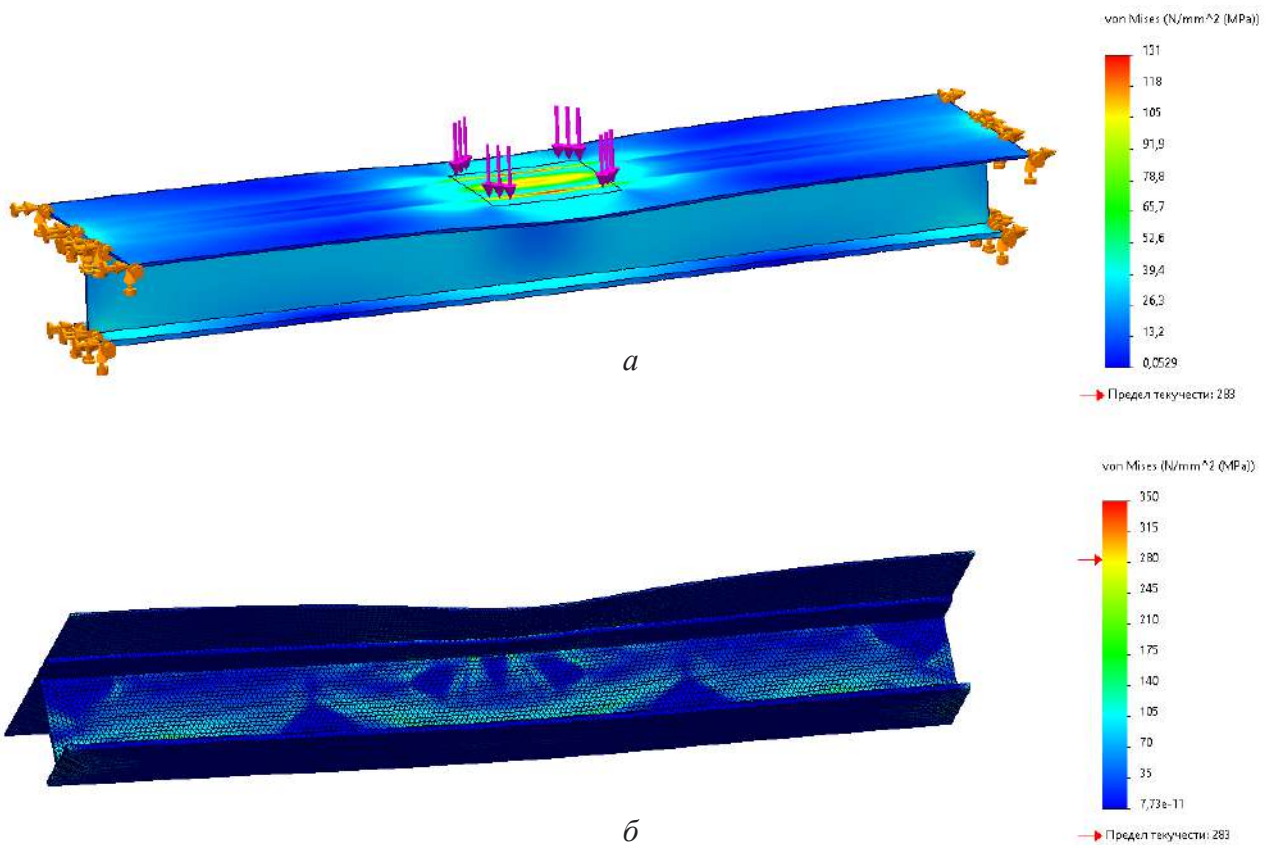
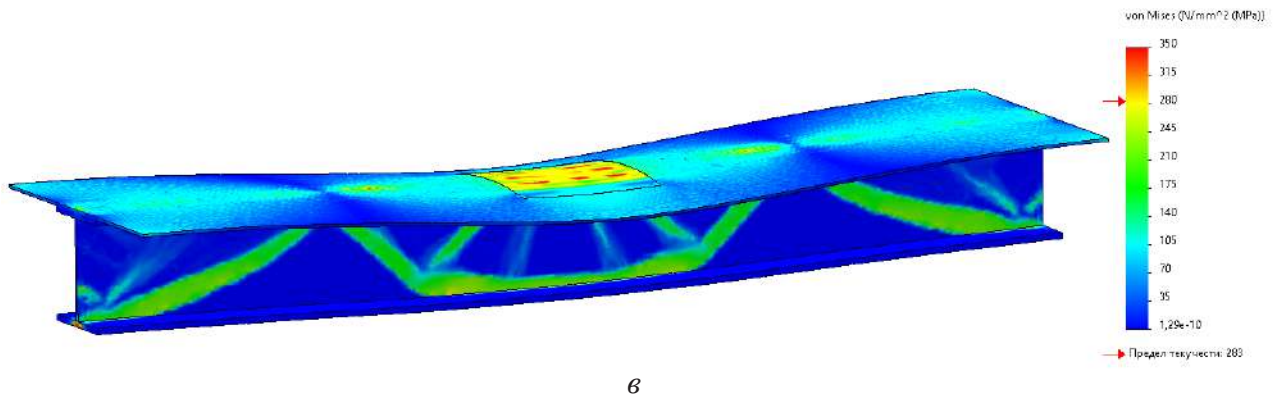


Рис. 4. Расчетная конечно-элементная модель балки

Результаты топологической оптимизации

Диаграммы распределения эквивалентных напряжений (МПа) в балке исходной конструкции и в балках после завершения топологической оптимизации показаны на рис. 5.

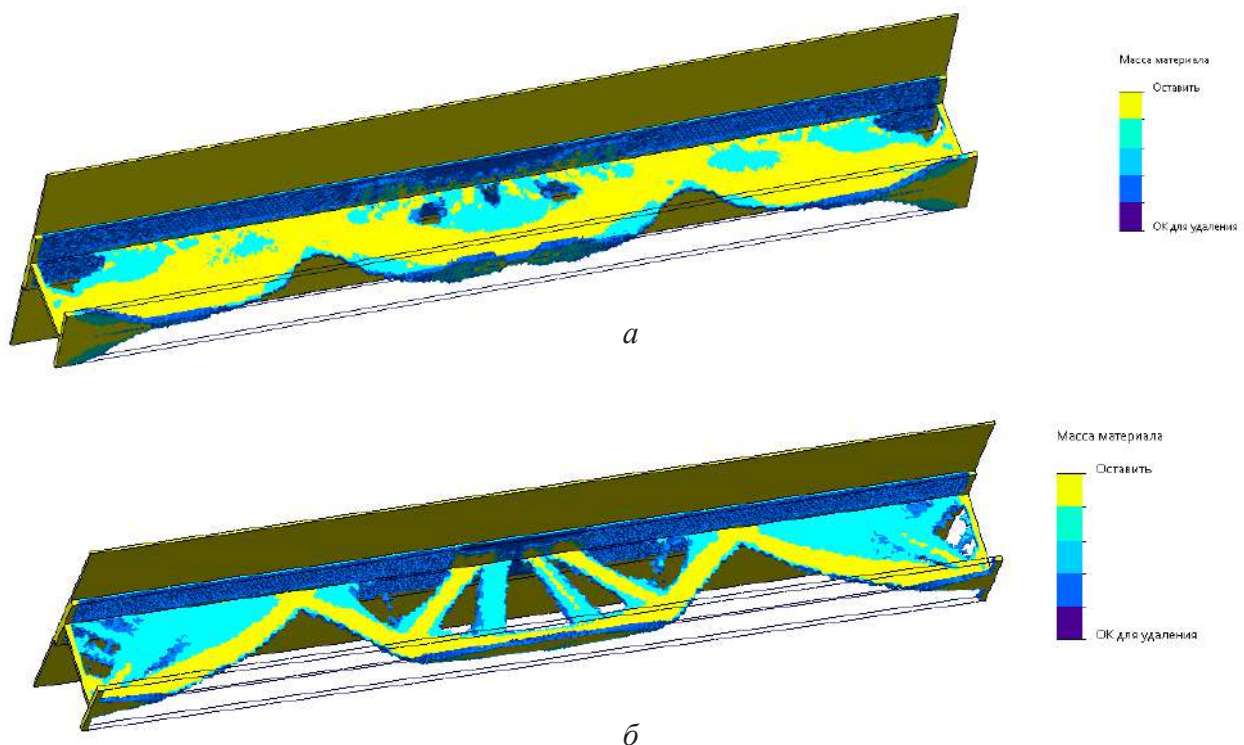




в

Рис. 5. Диаграмма распределения эквивалентных напряжений σ (МПа) в поддерживающей балке: *a* — исходной конструкции; *b* — после топологической оптимизации балки с ограничениями на изменение толщин стенки и полок двутавра; *в* — после топологической оптимизации балки без ограничений на изменение толщин стенки и полок двутавра

На рис. 6 показана диаграмма приоритета удаления металла балки по результатам топологической оптимизации с ограничениями на изменение толщин стенки и полок двутавра (рис. 6 *a*) и без указанных ограничений (рис. 6 *б*).



a

б

Рис. 6. Диаграмма приоритета удаления металла балки по результатам топологической оптимизации: *a* — с ограничениями на изменение толщин стенки и полок двутавра; *б* — без ограничений на изменение толщин стенки и полок двутавра

На рис. 7 показан внешний вид балки по результатам топологической оптимизации.

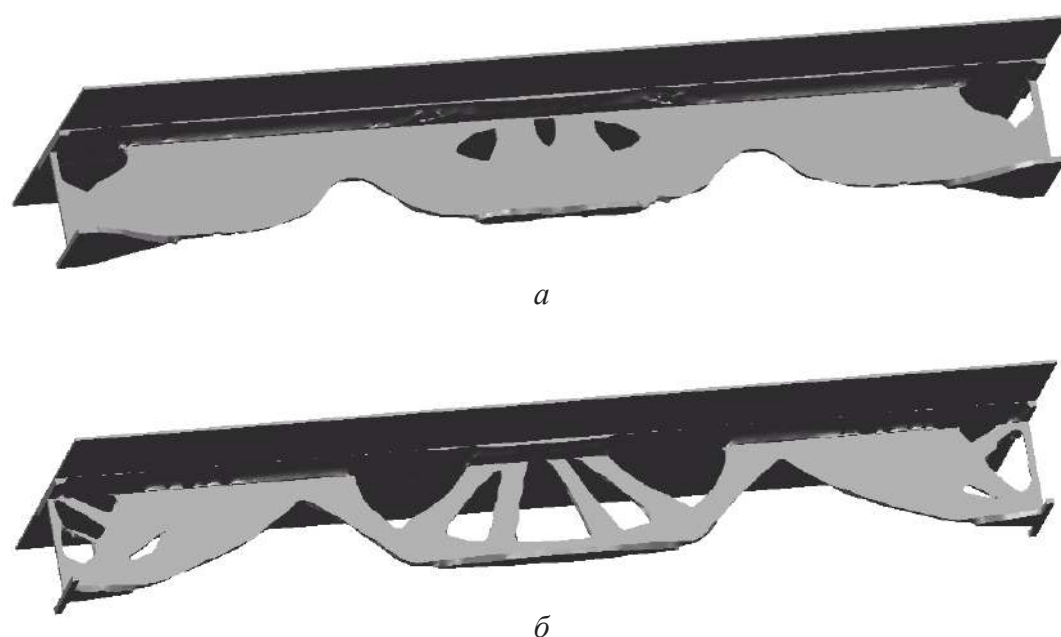


Рис. 7. Внешний вид балки по результатам топологической оптимизации:
a — с ограничениями на изменение толщин стенки и полок двутавра; *б* — без ограничений на изменение толщин стенки и полок двутавра

На основе полученных оптимизированных 3D-моделей с неравномерным распределением толщины по стенкам и полкам двутавра (рис. 7) была проведена технологическая обработка, после которой получили конструкцию балки, приведенной на рис. 8.

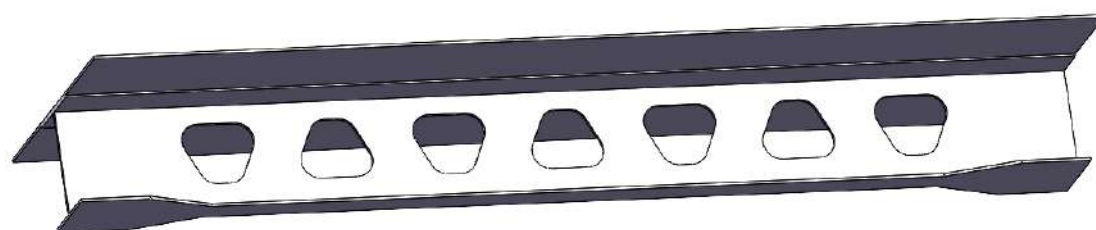


Рис. 8. Внешний вид балки после технологической обработки результатов оптимизации

Указанная балка также была рассчитана на прочность от нагрузки 50 кН. Диаграмма распределения эквивалентных напряжений в балке после технологической обработки результатов оптимизации показана на рис. 9.

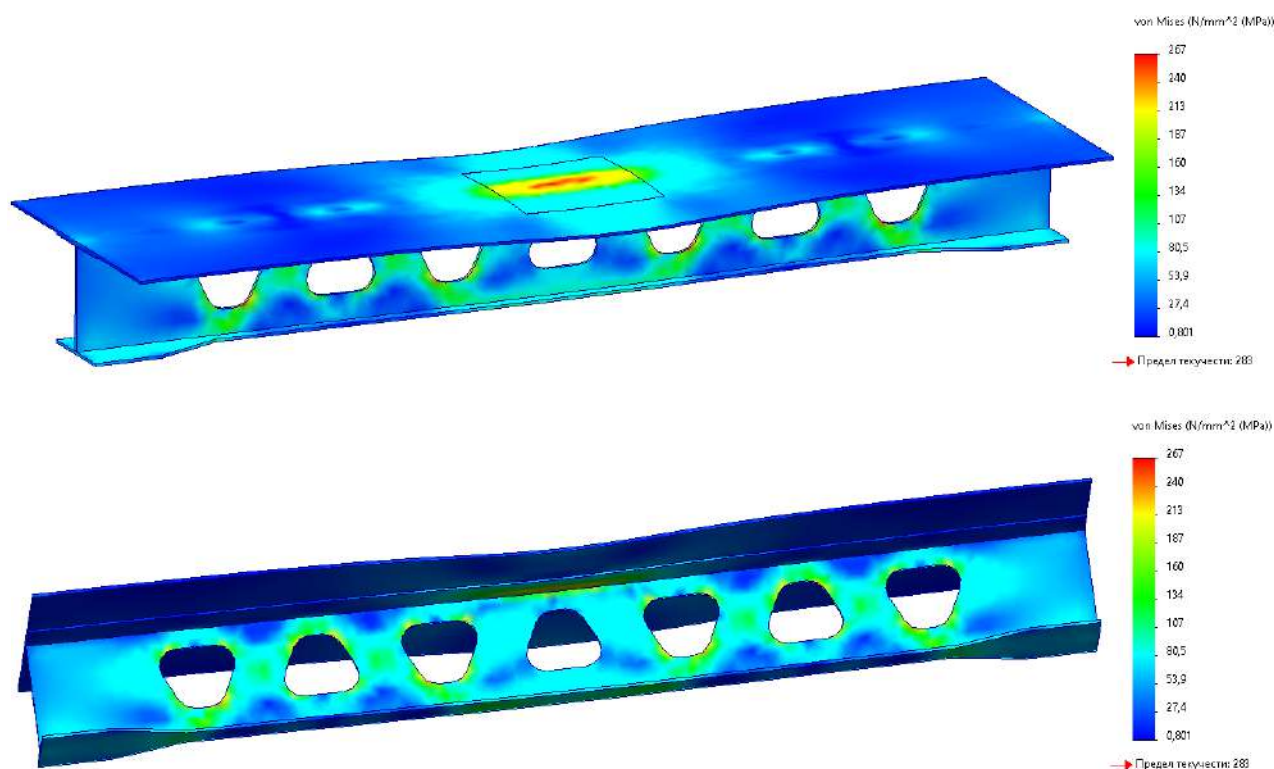


Рис. 9. Диаграмма распределения эквивалентных напряжений σ (МПа) в поддерживающей балке после технологической обработки результатов оптимизации

Анализ результатов топологической оптимизации

В табл. 1 приведены результаты примера топологической оптимизации поддерживающей балки пола полувагона с глухим кузовом от нагрузки 50 кН, приложенной к средней части балки.

ТАБЛИЦА 1. Результаты примера топологической оптимизации поддерживающей балки пола полувагона от нагрузки 50 кН

Параметр	Значение параметра для поддерживающей балки пола			
	До топологической оптимизации	По результатам топологической оптимизации		После технологической обработки результатов оптимизации
		С ограничениями на изменение толщины	Без ограничений на изменение толщины	
Масса, кг, без учета листа пола	60,3	24,1	3,2	23,4
Расчетные эквивалентные напряжения σ_{\max} , МПа	131	280	280	269
Коэффициент запаса прочности $k = [\sigma]/\sigma_{\max}$	2,14	1	1	1,04

Сравнение напряжений приведено на рис 10 а. Сравнение масс вариантов балок приведено на рис. 10 б.

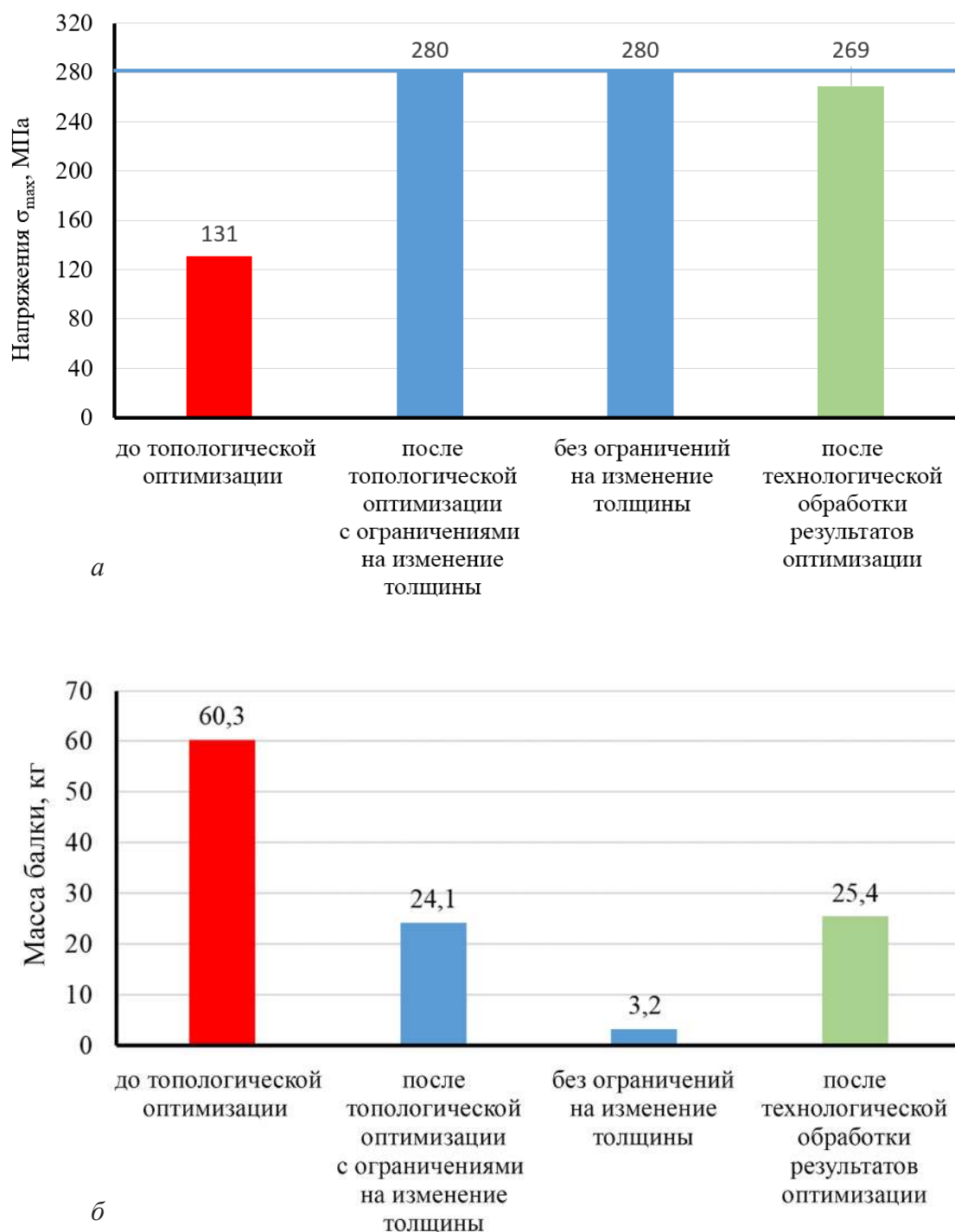


Рис. 10. Результаты примера топологической оптимизации: *а* — диаграмма сравнения максимальных расчетных эквивалентных напряжений σ_{max} вариантов балок до и после топологической оптимизации; *б* — диаграмма сравнения масс вариантов балок (без учета примыкающего листа пола) до и после топологической оптимизации

Общая оценка прочности кузова полувагона с оптимизированной поддерживающей балкой

Предложенная конструкция поддерживающей балки была проверена на прочность при действии сочетания расчетных нагрузок по режиму 1в согласно ГОСТ 33211 [6] (при действии сжимающей силы 2,5 МН).

По результатам расчета напряжения в балке при данном расчетном режиме не превышают 170 МПа, при этом напряжения в подкрепляемом листе пола также значительно ниже допускаемых значений.

Диаграмма распределения эквивалентных напряжений показана на рис. 11. Внешний вид кузова с оптимизированной поддерживающей балкой показан на рис. 12.

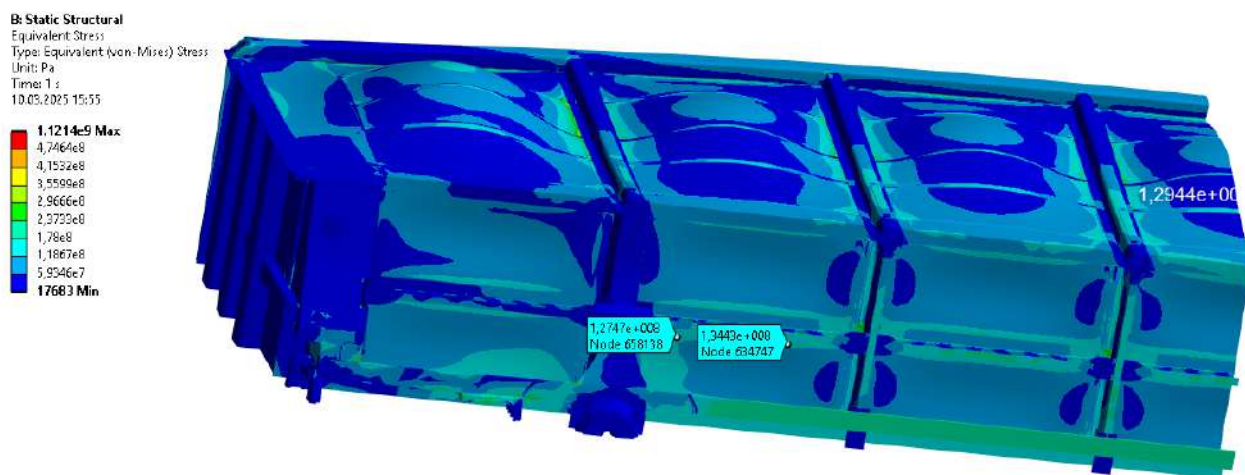


Рис. 11. Диаграмма распределения эквивалентных напряжений σ (МПа) в кузове полувагона (режим 1в по ГОСТ 33211, сила сжатия 2,5 МН)



Рис. 12. Внешний вид кузова с оптимизированной поддерживающей балкой

Анализ результатов

На примере топологической оптимизации поддерживающей балки пола полувагона с глухим кузовом можно сделать следующие выводы:

- применение топологической оптимизации для сварных балок без ограничения на изменение толщины листов не позволит получить технологичные результаты из-за градиентного характера вырождения конечных элементов по листам;
- использование топологической оптимизации для сварных балок с ограничением на изменение толщины листов позволяет определить приоритетные направления изменений поперечного сечения балки;
- после технологической обработки результатов оптимизации можно получить конструкцию со сниженной массой относительно исходного варианта, на рассмотренном примере — в 2,4 раза (снижение на 58 %);
- по результатам проверки прочности оптимизированной балки путем расчета модели кузова полувагона на сочетание нагрузок по режиму 1 в ГОСТ 33211 [6] напряжения в оптимизированной балке не превышают величину допустимых напряжений.

Заключение

В работе показана возможность применения метода топологической оптимизации применительно к решению инженерных задач при проектировании металлоконструкций грузовых вагонов.

Применение топологической оптимизации позволяет определить конструктивные направления для снижения массы несущего элемента, выполненного в виде сварной балки: определить формы и расположение вырезов, толщины листов и их форму (контур).

Предложена конструкция поддерживающей балки пола полувагона с глухим кузовом, вертикальный лист которой имеет трапецеидальные вырезы, а нижний лист — переменную ширину, что позволило снизить массу балки с сохранением ее прочностных характеристик.

Работа выполнена в рамках продолжения совместных исследований и разработки технических решений [16–20 и др.] специалистов АО «НВЦ «Вагоны» и ПГУПС, направленных на повышение прочности и надежности кузовов полувагонов.

Список источников

1. Бороненко Ю.П., Филиппова И.О. Использование высокопрочных сталей в вагоностроении // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 3 (58). С. 16–19. EDN UCCVOP
2. Бороненко Ю.П., Комайданов А.А., Дробжев С.М. Эффективность применения алюминиевых сплавов в конструкциях грузовых вагонов // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XVII Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 21–24 августа 2023 года). СПб.: ПГУПС, 2024. С. 7–13. EDN HDAJWL

3. Бороненко Ю.П., Дробжев С.М., Рахимов Р.В. Проблемы конструирования вагонов из алюминиевых сплавов // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы III Международной научно-технической конференции (Ташкент, 17–20 апреля 2024 года). Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2024. С. 42–48. EDN KPRNZD
4. Орлова А.М., Демин К.П., Попеску Р.В. Применение высокопрочной стали для создания полувагонов повышенной грузоподъемности // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. № 3. С. 7–23.
5. Орлова А.М., Демин К.П., Попеску Р.В. Как повысить эффективность полувагона: направления снижения технического коэффициента тары // Транспорт Российской Федерации. 2023. № 3–4 (106–107). С. 33–38.
6. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (с поправкой, с изменением № 1): утв. приказом Росстандарта от 05.06.2015 № 565-ст. М.: Стандартинформ, 2020. 54 с.
7. Булычев М.А., Бейн Д.Г. Математическое моделирование и оптимизация кузовов полувагонов с несущим полом. Брянск: Брянский государственный технический университет, 2014. 183 с.
8. Лозбинец В.П. Проектирование и оптимизация несущих систем кузовов вагонов. Брянск: Брянский государственный технический университет, 1997. 88 с.
9. Лозбинец Ф.Ю. Экономия материальных ресурсов в сфере производства и эксплуатации несущих кузовов вагонов. Брянск: Центр научно-технической информации, 2000. 131 с.
10. Эволюционное моделирование в проектировании несущих систем вагонов / И.Н. Серпик [и др.] // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2008. № 5. С. 21–25.
11. Кротов С.В., Кононов Д.П., Буйносов А.П. Оптимизация элементарной детали подвижного состава // Транспорт Урала. 2023. № 1 (76). С. 65–69.
12. Оптимизации топологии конструкций с использованием ПК ANSYS / Н.И. Марчук [и др.] // Тенденции развития науки и образования. 2019. № 47–46. С. 58–61.
13. Марчук Н.И., Прасоленко Е.В. Решение задач топологической оптимизации конструкций с использованием программы ANSYS // Новая наука: Опыт, традиции, инновации. 2017. Т. 2, № 4. С. 196–199.
14. Бейн Д.Г. Анализ напряженного состояния несущего настила пола четырехосного полувагона с глухим кузовом // Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. № 1 (29). С. 47–51.
15. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 320 с.
16. Бейн Д.Г., Исполова Е.А. Оценка прочности и разработка конструкций усиленных увязочных устройств полувагонов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. № 1 (57). С. 30–35.

17. Полувагон: патент на полезную модель № 169635 U1 Российская Федерация, МПК В61D 3/00, В61D 17/06, В61F 1/00. № 2016138777 / Бороненко Ю.П., Цыганская Л.В., Бондаренко К.В.; заявл. 30.09.2016; опубл. 28.03.2017; заявитель АО «Научно-внедренческий центр “Вагоны”».

18. Кузов полувагона: патент на полезную модель № 179519 U1 Российская Федерация, МПК В61D 3/00. № 2016152340 / Бороненко Ю.П., Бейн Д.Г., Третьяков А.В.; заявл. 29.12.2016; опубл. 17.05.2018; заявитель АО «Научно-внедренческий центр “Вагоны”».

19. Кузов полувагона: патент на полезную модель № 177170 U1 Российская Федерация, МПК В61D 17/06, В61D 23/00. № 2017119246 / Третьяков А.В., Бейн Д.Г.; заявл. 02.06.2017; опубл. 12.02.2018; заявитель АО «Научно-внедренческий центр “Вагоны”».

20. Полувагон: патент на полезную модель № 224505 U1 Российская Федерация, МПК В61D 3/20, В60P 7/13. № 2023122034 / Бороненко Ю.П., Цыганская Л.В., Бейн Д.Г.; заявл. 23.08.2023; опубл. 28.03.2024; заявитель АО «Научно-внедренческий центр “Вагоны”».

Дата поступления: 14.11.2025

Решение о публикации: 19.01.2026

Контактная информация:

БЕЙН Дмитрий Григорьевич — канд. техн. наук, заместитель главного конструктора; dgbain@mail.ru, dmitry.bein@nvc-vagon.ru

ЦЫГАНСКАЯ Людмила Валериевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; tcyganskaya@gmail.com

Topology optimization of floor-supporting beams in a solid-bottom gondola car

D. G. Bein¹, L. V. Tsyganskaya²

¹ JSC “Research and Development Center “Vagony”, Office 5N, 1st Floor, 22 Litera M Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190013, Russia

² Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Bein D. G., Tsyganskaya L. V. Topology optimization of floor-supporting beams in a solid-bottom gondola car // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 17–33. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-17-33. (In Russian)*

Abstract

Objective: to evaluate the potential for reducing the tare weight of a solid-bottom gondola car by lightening the floor-supporting welded beams through the application of the topology optimization method. **Methods:** a concise review of established parametric optimization approaches is presented. Topology optimization of the floor-supporting welded beam design was performed using the Evolutionary Structural Optimization (ESO) method. With an applied compressive force of 2.5 MN, the strength of the optimized supporting beam

configuration was verified under the design load combined designated as mode 1b in GOST 33211. **Results:** implementing topology optimization on the welded beams of freight car frames, while constraining permissible sheet thickness variations, enables targeted modification of the beam cross-section. After technological refinement of the optimization outcomes, a beam design with less mass has been produced. Comparing the example to the original design, the mass has been lowered by a factor of 2.4 or 58%. **Practical significance:** this research demonstrates the applicability of topology optimization techniques to engineering design issues for metal freight vehicle structures. A supporting beam configuration that reduces mass while preserving the strength properties of the beam has been proposed. It consists of vertical sheets with trapezoidal cutouts and a lower sheet of variable width.

Keywords: gondola car, gondola car frame, strength, topology optimization

References

1. Boronenko Yu. P., Filippova I. O. Ispol'zovanie vysokoprochnykh stalej v vagonostroenii // *Transport Rossijskoj Federatsii*. 2015. No. 3 (58). S. 16–19. (In Russian)
2. Boronenko Yu. P., Komajdanov A. A., Drobzhev S. M. Effektivnost' primeneniya alyuminiyevykh splavov v konstruktsiyakh gruzovykh vagonov // *Podvizhnoj sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii (Sankt-Peterburg, 21–24 avgusta 2023 goda)*. SPB: PGUPS, 2024. S. 7–13. (In Russian)
3. Boronenko Yu. P., Drobzhev S. M., Rakhimov R. V. Problemy konstruirovaniya vagonov iz alyuminiyevykh splavov // *Zheleznodorozhnyj podvizhnoj sostav: problemy, resheniya, perspektivy: materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii (Tashkent, 17–20 aprelya 2024 goda)*. Tashkent: Tashkentskij gosudarstvennyj transportnyj universitet, 2024. S. 42–48. (In Russian)
4. Orlova A. M., Demin K. P., Popesku R. V. Primenenie vysokoprochnoj stali dlya sozdaniya poluvagonov povyshennoj gruzopod'emnosti // *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij*. 2024. No. 3. S. 7–23. (In Russian)
5. Orlova A. M., Demin K. P., Popesku R. V. Kak povysit' effektivnost' poluvagona: napravleniya snizheniya tekhnicheskogo koefitsienta tary // *Transport Rossijskoj Federatsii*. 2023. No. 3–4 (106–107). S. 33–38. (In Russian)
6. GOST 33211–2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam (s Popravkoj, s Izmeneniem № 1): utv. prikazom Rosstandarta ot 05.06.2015 № 565-st. M.: Standartinform, 2020. 54 s. (In Russian)
7. Bulychev M. A., Bejn D. G. Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya kuzovov poluvagonov s nesushchim polom. Bryansk: Bryanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2014. 183 s. (In Russian)
8. Lozbinev V. P. Proektirovanie i optimizatsiya nesushchikh sistem kuzovov vagonov. Bryansk: Bryanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 1997. 88 s. (In Russian)
9. Lozbinev F. Yu. Ekonomiya material'nykh resursov v sfere proizvodstva i ekspluatatsii nesushchikh kuzovov vagonov. Bryansk: Tsentr nauchno-tehnicheskoy informatsii, 2000. 131 s. (In Russian)
10. Evolyutsionnoe modelirovanie v proektirovanii nesushchikh sistem vagonov / I. N. Serpik [i dr.] // *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*. 2008. No. 5. S. 21–25. (In Russian)

11. Krotov S. V., Kononov D. P., Bujnosov A. P. Optimizatsiya elementarnoj detali podvizhnogo sostava // *Transport Urala*. 2023. No. 1 (76). S. 65–69. (In Russian)
12. Optimizatsii topologii konstruksij s ispol'zovaniem PK ANSYS / N. I. Marchuk [i dr.] // *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2019. No. 47–46. S. 58–61. (In Russian)
13. Marchuk N. I., Prasolenko E. V. Reshenie zadach topologicheskoy optimizatsii konstruksij s ispol'zovaniem programmy ANSYS // *Novaya nauka: Opyt, traditsii, innovatsii*. 2017. T. 2, no. 4. S. 196–199. (In Russian)
14. Bejn D. G. Analiz napryazhennogo sostoyaniya nesushchego nastila pola chetyrekhosnogo poluvagona s glukhim kuzovom // *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. No. 1 (29). S. 47–51. (In Russian)
15. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh). M.: GosNIIV–VNIIZhT, 1996. 320 s. (In Russian)
16. Bejn D. G., Ispolova E. A. Otsenka prochnosti i razrabotka konstruksij usilennykh uvyazochnykh ustrojstv poluvagonov // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2015. No. 1 (57). S. 30–35. (In Russian)
17. Poluvagon: patent na poleznuyu model' № 169635 U1 Rossijskaya Federatsiya, MPK B61D 3/00, B61D 17/06, B61F 1/00. No. 2016138777 / Boronenko Yu. P., Tsyganskaya L. V., Bondarenko K. V.; zayavl. 30.09.2016; opubl. 28.03.2017; zayavitel' AO “Nauchno-vnedrencheskij tsentr “Vagony”. (In Russian)
18. Kuzov poluvagona: patent na poleznuyu model' № 179519 U1 Rossijskaya Federatsiya, MPK B61D 3/00. No. 2016152340 / Boronenko Yu. P., Bejn D. G., Tret'yakov A. V.; zayavl. 29.12.2016; opubl. 17.05.2018; zayavitel' AO “Nauchno-vnedrencheskij tsentr “Vagony”. (In Russian)
19. Kuzov poluvagona: patent na poleznuyu model' № 177170 U1 Rossijskaya Federatsiya, MPK B61D 17/06, B61D 23/00. No. 2017119246 / Tret'yakov A. V., Bejn D. G.; zayavl. 02.06.2017; opubl. 12.02.2018; zayavitel' AO “Nauchno-vnedrencheskij tsentr “Vagony”. (In Russian)
20. Poluvagon: patent na poleznuyu model' № 224505 U1 Rossijskaya Federatsiya, MPK B61D 3/20, B60P 7/13. No. 2023122034 / Boronenko Yu. P., Tsyganskaya L. V., Bejn D. G.; zayavl. 23.08.2023; opubl. 28.03.2024; zayavitel' AO “Nauchno-vnedrencheskij tsentr “Vagony”. (In Russian)

Received: 14.11.2025

Accepted: 19.01.2026

Author's information:

Dmitry G. BEIN — PhD in Engineering, Deputy Chief Designer; dgbain@mail.ru,
dmitry.bein@nvc-vagon.ru

Ludmila V. TSYGANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of “Wagons and Wagon Economy”; tcyganskaya@gmail.com

УДК 621.33

Совершенствование кожуха зубчатых передач для электроподвижного состава безэкипировочного применения

Д. А. Колотай¹, Е. В. Опарина²

¹ АО «Трансмашхолдинг», Россия, 119048, Москва, ул. Ефремова, 10, офис 1003

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Колотай Д. А., Опарина Е. В. Совершенствование кожуха зубчатых передач для электроподвижного состава безэкипировочного применения // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 34–44. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-34-44

Аннотация

Цель: увеличить эксплуатационные показатели кожухов зубчатой передачи локомотивов, устранить потери смазочных материалов при эксплуатации подвижного состава. **Методы:** проведен анализ повреждений кожухов зубчатой передачи локомотивов, обозначены причины повреждений кожухов зубчатой передачи. Проведен анализ существующих конструкций кожухов с точки зрения надежности, прочности и жесткости конструкции. **Результаты:** предложены конструктивные решения для кожуха зубчатой передачи, позволяющие повысить его прочность, жесткость и долговечность, а также экономию смазочных материалов. **Практическая значимость:** заключается в увеличении пробега локомотивов без экипировки колесно-моторных блоков. Обозначена экологическая необходимость применения усовершенствованного кожуха зубчатых передач.

Ключевые слова: кожух зубчатой передачи, смазочные материалы, конструктивные решения

Введение

На электровозах и тепловозах применяются одноступенчатые одно- и двухсторонние тяговые редукторы для преобразования и передачи вращающего момента от тяговых электродвигателей (ТЭД) к колесным парам. Надежная работа этой конструкции важна для обеспечения безопасности движения поездов [1].

С целью защиты от внешних воздействий, а также для обеспечения смазки зубьев зубчатая передача помещается в относительно легкие металлические кожухи, сваренные из тонколистовой стали и заполненные редукторной осерненной смазкой.

Кожух зубчатой передачи (КЗП) состоит из двух частей (половин), охватывающих вал тягового двигателя и ось колесной пары. Верхняя и нижняя половины кожуха крепятся к остову тягового двигателя через бобышки крепления (рис. 1, позиции 2, 10). Дополнительно крепление половин происходит через соединительные болты сочленения (рис. 1, позиция 7). Между половинами кожуха имеется пропитанное парафином войлочное уплотнение, которое предотвращает вытекание смазки из кожуха по стыку половин, а также в местах посадки вала тягового двигателя и оси колесной пары [1, 2].

Существующие конструкции кожухов зубчатых передач, применяемые в настоящее время на железнодорожном транспорте и разработанные отечественными конструкторскими организациями, не претерпели существенных изменений за многие годы (рис. 1).

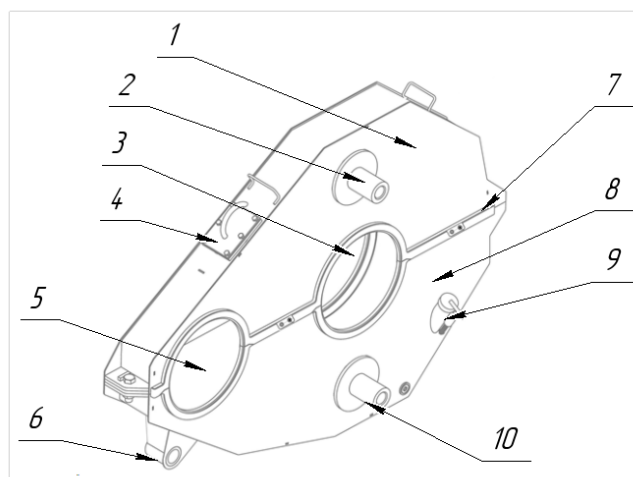


Рис. 1. Кожух зубчатой передачи:

1, 8 — верхняя и нижняя половины; 2, 10 — бобышки крепления; 3 — посадочное место оси колесной пары; 4 — трубка сапун; 5 — посадочное место вала ТЭД; 6 — втулка болта подвески КЗП; 7 — болты сочленения; 9 — заправочная горловина

В работе [3] приведена статистика отказов узлов колесно-моторного блока тягового подвижного состава, эксплуатируемого на Северо-Кавказской железной дороге за период 2016–2019 годов (рис. 2).

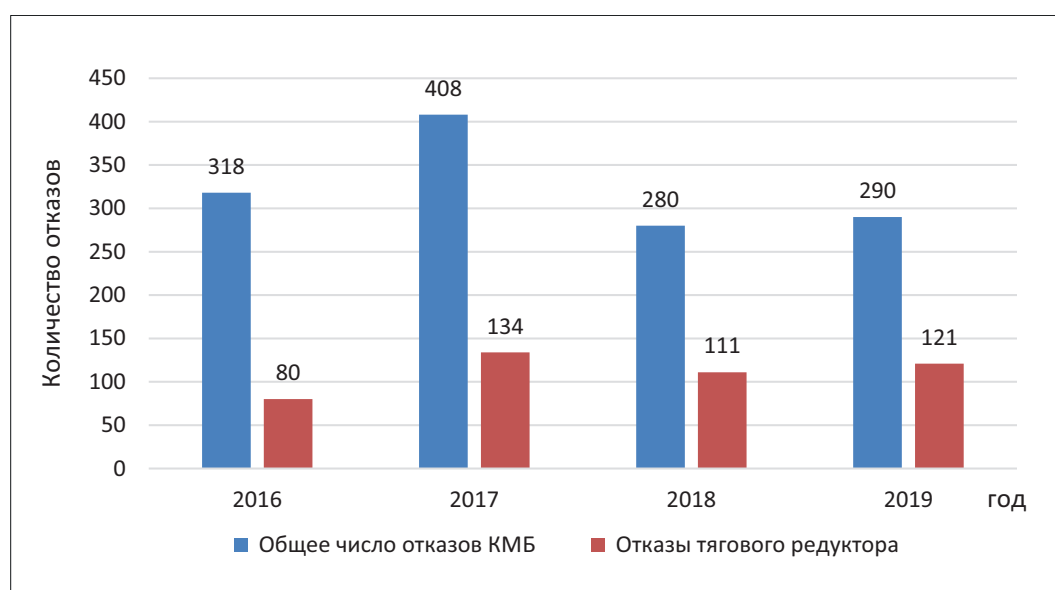


Рис. 2. Статистика отказов колесно-моторных блоков электровозов на СКЖД за период 2016–2019 годов

Из рис. 2 следует, что от 25 до 42 % общего числа отказов колесно-моторных блоков составляют отказы тягового редуктора. Работа без смазки является основным источником отказов, вызывая нагрев зубчатой передачи [3].

На рис. 3 приведена статистика отказов оборудования электровозов ЭП2К, эксплуатируемых на Октябрьской железной дороге, за 9 месяцев 2025 года.

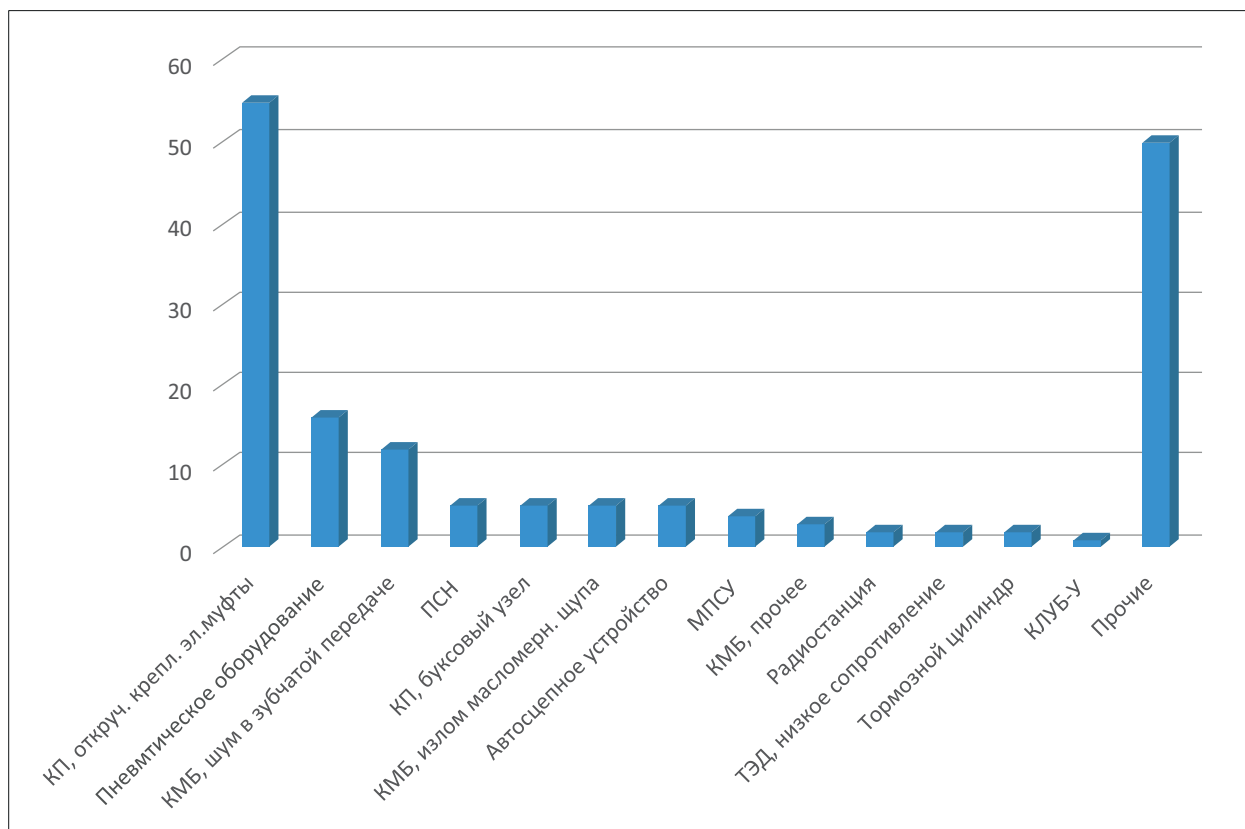


Рис. 3. Основные отказы оборудования электровозов ЭП2К за 9 месяцев 2025 года

Из рис. 3 следует, что около 45 % случаев неисправностей оборудования приходится на отказы в КМБ. Из них 25 % приходится на неисправности тягового редуктора.

Согласно статистике отказов за 2024–2025 годы (данные АСУТ ОАО «РЖД»), по неисправностям кожухов зубчатой передачи были отставлены из эксплуатации 64 локомотива для последующей замены КЗП (236 шт.). В процессе эксплуатации на пробегах от 10 до 150 тыс. км фиксировались следующие отказы:

- изломы штифтов крепления масломерных щупов;
- разрушение корпуса масломерного щупа;
- излом крепления щупов маслосливных горловин;
- излом стопорных шайб тяги эластичной муфты;
- износ резьбы валиков поводков упругой связи полого вала и т. д.

Основной причиной указанных несоответствий является недостаток смазки в редукторе. В среднем затраты на ремонт одного КМБ составляют 80 тыс. руб.

Существующие недостатки кожухов тягового редуктора

Анализ конструкции КЗП позволяет сделать следующие выводы об их недостатках:

1. Низкая герметичность уплотнений кожухов, которая приводит к вытеканию смазки по периметру соединения половин кожуха и в местах сопряжения с валом ТЭД. Как следствие, загрязняется рельсовый путь, особенно в местах длительной стоянки электровозов и тепловозов (пути отстоя локомотивов на станциях, экипировочные пути, тракционные пути локомотивных депо) (рис. 4, 5).



Рис. 4. Разлив смазки на путях отстоя локомотива с негерметичным КЗП
(фото Д. А. Колотай)

2. Низкая морозостойкость редукторной смазки (О-Л, З) ТУ-0254-082-70351853-2015. При низких температурах редукторная смазка оседает на стенках корпуса редуктора. При этом становится невозможным контроль уровня смазки существующими контрольными щупами и приспособлениями в ходе технического обслуживания.

3. Низкие эксплуатационные свойства стали, из которой изготавливают КЗП. Сталь марки Ст3 обладает низкой коррозионной стойкостью в агрессивных средах и в условиях повышенной влажности. Сталь не имеет в составе легирующих добавок, защищающих от подобного рода воздействий. При низких температурах

сталь теряет пластичность, что отрицательно сказывается на ее механических свойствах. Увеличенное содержание углерода ухудшает свойства стали при сваривании: сварные швы становятся пористыми и склонными к трещинам, что приводит к снижению долговечности кожухов.

Перечисленные недостатки являются основными причинами дорогостоящего ремонта колесно-моторных блоков в условиях сервисных предприятий. Актуальной задачей является поиск новых технических решений с использованием современных технологий и материалов [4].



Рис. 5. Состояние существующей конструкции КЗП после 30 тыс. км пробега локомотива (фото Д. А. Колотай)

Конструктивные решения по совершенствованию кожухов зубчатой передачи

Предлагается ряд технических решений по совершенствованию кожухов зубчатых передач, которые позволят улучшить их основные функции — защитную, смазочную и несущую [5]:

1. В предлагаемой модификации кожуха для повышения герметичности между его половинами по всему периметру разъема вместо войлочного уплотнения предлагается применять лабиринтное уплотнение из силикона. Такой тип уплотнения не вступает в реакцию с химическими веществами, маслами и щелочами, не меняет своей структуры и свойств под воздействием большинства физических процессов. Силиконовое уплотнение обладает термостойкостью в диапазоне температур от -60 до $+280$ °С с пиковой нагрузкой до $+300$ °С и имеет низкую теплопроводность. Данное решение позволит повысить надежность смазки зубчатой передачи.

2. Установка дополнительных креплений в сочленении КЗП повысит жесткость конструкции (рис. 6, позиции 5, 10, 12, 14). Такое крепление усилит стыковое соединение нижней и верхней половин кожуха, исключит их относительное смещение и зазоры. Данное решение позволит повысить защитную и несущую функции КЗП.

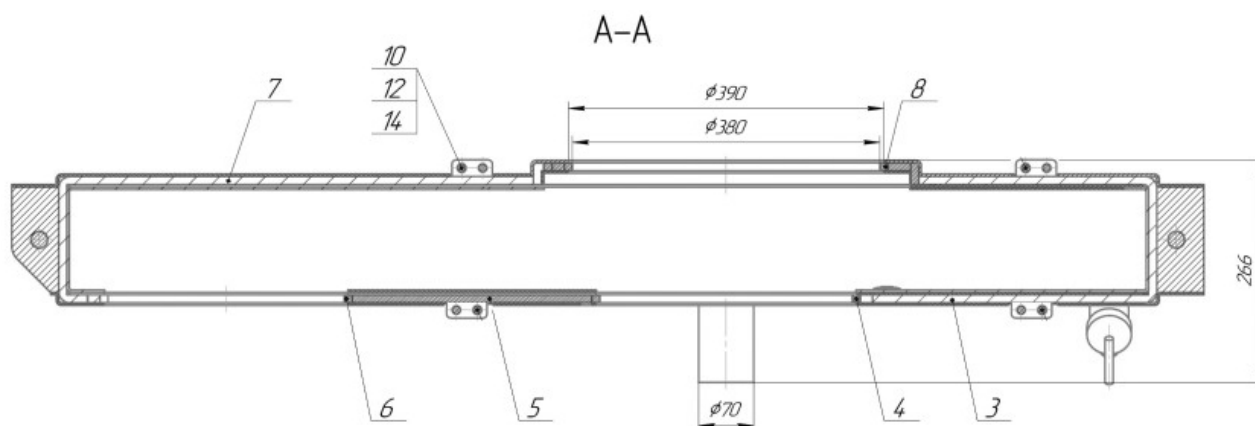


Рис. 6. Установка дополнительного крепления в сочленении КЗП на нижней половине кожуха (позиции 5, 10, 12, 14 — дополнительные крепления, направляющий валик и отверстие под болтовое крепление)

3. Еще одним предлагаемым решением для повышения надежности смазки зубчатой передачи является замена смазки (ОС-Л, 3) ТУ-0254-082-70351853-2015 на трансмиссионное синтетическое масло Mobil Delvac 1 Gear Oil 75w90 API GL-5/MT-1. Данное масло обеспечивает защиту от износа, коррозии зубчатых колес, что критически важно для транспортных средств, эксплуатируемых в тяжелых условиях, а также позволит продлить срок службы уплотнений, минимизируя необходимость в их частой замене и техническом обслуживании.

4. Для удобства визуального контроля уровня масла в предлагаемой модификации КЗП в нижней половине кожуха устанавливается маслоуказатель, который состоит из прозрачного пластмассового окна, уплотненного маслостойкой резиной и стальными прижимными направляющими (рис. 7 а), и металлической линейки (рис. 7 б). Две полосы белой эмали обозначают предельные минимальный и максимальный уровни смазки.

5. Несущую функцию КЗП предлагается повысить за счет замены марки стали. При детальном изучении свойств сталей выбор остановился на стали 09Г2С — низколегированной конструкционной стали, разработанной специально для эксплуатации в сложных климатических условиях. Она содержит марганец и кремний, что обеспечивает высокую прочность и ударную вязкость даже при низких температурах. Этот материал активно используется при создании таких конструкций, которые применяются в сложных условиях: к ним относятся

температурный режим от -70 до $+425$ °С, повышенная влажность, контакт металла с химически активными жидкостями и газами, разноплановые нагрузки.

Предлагаемые решения в совокупности повысят эксплуатационные показатели кожуха зубчатой передачи и снизят необходимость дополнительной экипировки КМБ редукторной смазкой на ТО-2 (3), ТР-1.

*а**б*

Рис. 7. Маслоуказательное окно и масломерная линейка модифицированного кожуха зубчатой передачи (фото Д. А. Колотай)

Практическое применение

За период с 2013 по 2018 год описанная конструкция усовершенствованных кожухов была успешно апробирована на электровозах серий 2ЭС6 и ВЛ10 Западно-Сибирской железной дороги. Более 1000 изделий получили положительные отзывы от сервисных компаний. Изобретение отмечено руководством ЗСЖД [6].



Рис. 8. Эксплуатация усовершенствованной конструкции кожуха зубчатой передачи. Пробег локомотивов — более 300 тыс. км (фото Д. А. Колотай)

Расчет экономической эффективности от применения модифицированной конструкции КЗП

Стоимость переоснащения одной секции локомотива ВЛ10 составляет 1,2 млн руб. (замена восьми КЗП). Согласно статистике отказов, за 2024–2025 годы в среднем из эксплуатации в год для внеплановой замены КЗП отставляется порядка 6 % локомотивов. Стоимость ремонта одного КМБ с заменой КЗП составляет в среднем 80 тыс. руб. Стоимость простоя одного локомотива в сутки — 100 тыс. руб.

Окупаемость затрат на оснащение парка, состоящего из 30 односекционных локомотивов, ожидается за счет снижения количества внеплановых случаев ремонта КМБ по причине отказов КЗП, а также за счет снижения времени простоя локомотива в ремонте. Вместе с этим использование на тяговом подвижном составе предлагаемой модификации кожуха тягового редуктора приводит к снижению экономических затрат на экипировочные материалы и технологические операции при обслуживании КМБ на таких видах технического обслуживания и текущего ремонта, как ТО-2(3) и ТР-1 (табл. 1, данные из автоматизированной системы управления тяговыми ресурсами (АСУТ) ОАО «РЖД»).

ТАБЛИЦА 1. Оценка экономии смазочного материала от внедрения модифицированной конструкции кожуха зубчатой передачи

Серия локомотива	Средний расход осерненной смазки за период 36 мес. от выпуска с завода до ТР-3. (расчет на одну секцию), кг	Фактические затраты на осерненную смазку для базовых моделей КЗП без учета трудозатрат на экипировку (расчет на одну секцию), тыс. руб.	Фактические затраты на осерненную смазку при применении модернизированной конструкции КЗП за период 36 мес. от выпуска с завода до ТР-3 (расчет на одну секцию), тыс. руб.	Экономический эффект за период 36 мес. (расчет на одну секцию), тыс. руб.
ТЭМ18ДМ	230–250	39,1–42,5	0	39,1–42,5
ЗЭС6	230–250	39,1–42,5	0	39,1–42,5

Ориентировочный расчет показал, что срок окупаемости затрат на оснащение модифицированным типом КЗП локомотивного парка, состоящего из 30 единиц, составит порядка 5 лет (рис. 9).

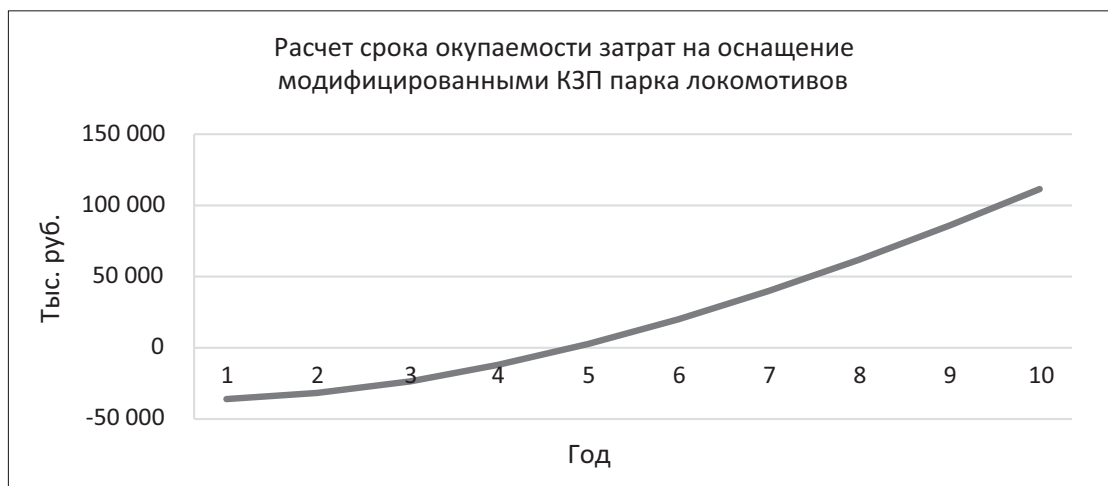


Рис. 9. Ориентировочный расчет срока окупаемости затрат на оснащение локомотивного парка модифицированными КЗП

Выводы

1. В ходе анализа отказов тягового подвижного состава установлено, что порядка 25 % от общего числа отказов колесно-моторных блоков составляют отказы тягового редуктора. Основной причиной отказов является недостаток смазки в редукторе КМБ.

2. Анализ существующей традиционной конструкции кожуха зубчатой передачи выявил ряд недостатков, таких как низкая герметичность уплотнений, которая приводит к вытеканию смазки по периметру соединения половин кожуха; низкие эксплуатационные свойства марки стали, из-за которых кожух подвержен интенсивной коррозии и деформациям в условиях низких температур; низкая морозостойкость редукторной смазки, из-за чего становится невозможным контроль уровня смазки существующими контрольными щупами и приспособлениями в условиях сервисных предприятий.

2. Предлагаемые конструктивные решения, направленные на модификацию существующей конструкции кожуха, позволят улучшить условия эксплуатации зубчатой передачи за счет повышения надежности смазки зубчатых колес и несущей способности КЗП, увеличат герметичность соединения половин кожуха и продлят долговечность КЗП.

3. Ориентировочный расчет срока окупаемости затрат на оснащение парка из 30 локомотивов модифицированными КЗП показал окупаемость вложений за 5 лет за счет увеличения надежности узла колесно-моторного блока, уменьшения времени простоя локомотивов на внеплановом ремонте, экономии средств на экипировочных материалах и связанных технологических операциях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бирюков И. В., Беляев А. И., Рыбников Е. К. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог. М.: Транспорт, 1986. 256 с.
2. Школьный М. И., Ахмедов Г. Г., Демченко И. П. Кожухи зубчатых передач. Проблемы и альтернативные конструкции // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2017. № 2 (76). С. 43–51.
3. Губарев П. В., Шапшал А. С., Курочкин А. С. Анализ надежности узлов электровозов по Северо-Кавказской железной дороге за 2016–2019 гг. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 3. С. 69–73.
4. Андриевский А. Г., Чабан Е. А., Москвичев В. В. Анализ загруженности кожуха зубчатой передачи электровоза при условии ослабления затяжки болтов его крепления к тяговому двигателю // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18, вып. 2. С. 201–210.
5. Кожух зубчатой передачи для электровозов: патент № 78158. Российская Федерация, МПК В61F 15/22(2006/01) / Михайлов В. В., Одинцов В. Г., Колотай Д. А.; заявл. 16.06.2008; опубл. 20.11.2008; патентообладатель ООО «Техноком».
6. Без слабых мест // Гудок. Вып. 29.07.2008. С. 4.

Дата поступления: 26.11.2025

Решение о публикации: 19.01.2026

Контактная информация:

КОЛОТАЙ Дмитрий Анатольевич — аспирант, ОЦППКВК, Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), АО «Трансмашхолдинг», главный специалист по надежности тепловозов Дирекции по операционной деятельности; d.kolotay@tmholding.ru

ОПАРИНА Екатерина Владимировна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций», доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»; oparina-ekaterina@inbox.ru

Improvement of gearbox housings for unequipped electric rolling stock

D. A. Kolotay¹, E. V. Oparina²

¹ JSC Transmashholding, 10 Efremova str., office 1003, Moscow, 119048, Russia

² Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kolotay D. A., Oparina E. V. Improvement of gearbox housings for unequipped electric rolling stock // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 34–44. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-34-44. (In Russian)

Abstract

Objective: to improve the operational performance of gearbox housings in locomotives and prevent lubricant losses during rolling stock operation. **Methods:** an analysis of locomotive gearbox housing damage was conducted to identify underlying causes. Existing gear housing designs were reviewed with emphasis on reliability, strength, and structural stiffness. **Results:** design solutions for the gear housing have been proposed to enhance its strength, stiffness, and durability, while reducing lubricant consumption. **Practical significance:** the proposed improvements will enable increased locomotive mileage without additional outfitting of wheel–motor units. The environmental imperative for adopting the enhanced gearbox housing design has been emphasized.

Keywords: gearbox housing, lubricants, design solutions

References

1. Biryukov I.V., Belyaev A.I., Rybnikov E.K. Tyagovye peredachi elektropodvizhnogo sostava zheleznykh dorog. M.: Transport, 1986. 256 s. (In Russian)
2. Shkol'nyj M.I., Akhmedov G.G., Demchenko I.P. Kozhukhi zubchatykh peredach. Problemy i al'ternativnye konstruksii // Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroeniya. 2017. No. 2 (76). S. 43–51. (In Russian)
3. Gubarev P.V., Shapshal A.S., Kurochkin A.S. Analiz nadezhnosti uzlov elektrovozov po severo-kavkazskoj zheleznoj doroge za 2016–2019 gg. // Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2021. No. 3. S. 69–73. (In Russian)
4. Andrievskij A.G., Chaban E.A., Moskvichev V.V. Analiz zagruzhennosti kozhukha zubchatoy peredachi elektrovoza pri uslovii oslableniya zatyazhki boltov ego krepleniya k tyagovomu dvigatelyu // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2021. T. 18, vyp. 2. S. 201–210. (In Russian)
5. Kozhukh zubchatoy peredachi dlya elektrovozov: patent № 78158. Rossijskaya Federatsiya, MPK V61F 15/22(2006/01) / Mikhajlov V.V., Odintsov V. G, Kolotaj D.A.; zayavl. 16.06.2008; opubl. 20.11.2008; patentoobladatel' OOO "Tekhnokom". (In Russian)
6. Bez slabykh mest // Gudok. Vyp. 29.07.2008. S. 4. (In Russian)

Received: 26.11.2025

Accepted: 19.01.2026

Author's information:

Dmitry A. KOLOTAY — Postgraduate Student, OTSPNPKVK, Russian University of Transport (MIIT), JSC Transmashholding, Chief Specialist for Locomotive Reliability of the Directorate for Operational Activities; d.kolotay@tmholding.ru

Ekaterina V. OPARINA — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department "Mechanics and Strength of Materials and Structures", Associate Professor of the Department "Ground Transport and Technological Complexes"; oparina-ekaterina@inbox.ru

УДК 625.033.34

О физическом смысле коэффициентов, учитывающих величину приведенной массы железнодорожного пути, в расчете пути на прочность

А. Ю. Антонов, Л. С. Блажко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Антонов А. Ю., Блажко Л. С. О физическом смысле коэффициентов, учитывающих величину приведенной массы железнодорожного пути, в расчете пути на прочность // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 45–57. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-45-57

Аннотация

Цель: определить необходимость корректировки постоянных значений коэффициентов α_0 и α_1 , заложенных в «Методику оценки воздействия подвижного состава на путь по условию обеспечения его надежности» (далее — Методика). **Методы:** анализ аналитических выражений Методики и результатов экспериментального исследования колебательного процесса грунтов земляного полотна, возникающего при вибродинамическом взаимодействии пути и подвижного состава. **Результаты:** получена функциональная зависимость приведенной массы пути m_n от коэффициента α_0 и приведенной массы колеса m_k . Выявлено, что отсутствует физический смысл аналитических выражений по определению значений коэффициента α_1 , поскольку при любых значениях α_1 справедливо одно и то же решение, подтверждающее отсутствие зависимости приведенной массы пути m_n от реального процесса взаимодействия пути и подвижного состава. **Практическая значимость:** с учетом достаточно значительного изменения эксплуатационных условий взаимодействия пути и подвижного состава за период с момента введения коэффициентов α_0 и α_1 в Методику расчета показателей напряженно-деформированного состояния пути (с 1972 года по настоящее время) полученные результаты позволяют говорить о необходимости пересмотра как числовых значений данных параметров, так и методов их определения.

Ключевые слова: железнодорожный путь, взаимодействие пути и подвижного состава, вертикальное воздействие колеса на рельс, расчет пути на прочность, приведенная масса пути, коэффициенты α_0 и α_1

Конечным действием расчета железнодорожного пути на прочность является сравнение расчетных величин напряжений в элементах верхнего строения пути с оценочными критериями. Результаты сопоставления расчетных и критериальных величин применяются при решении ряда задач путевого хозяйства: выбор эксплуатационных характеристик для обращения модернизированных и новых подвижных единиц, выбор рационально обоснованной скорости движения для сложных эксплуатационных условий, обоснование характеристик элементов верхнего строения пути и др. Расчет железнодорожного пути на прочность позволяет получить численные значения показателей напряженно-деформированного состояния пути: вертикального прогиба рельса; изгибающего момента рельса; максимально вероятной динамической силы, действующей на рельсы и шпалы, а также напряжений в элементах железнодорожного пути [1–3].

Результаты прочностного расчета используются как при проектировании новых железнодорожных линий, так и при обслуживании существующих, поскольку в процессе эксплуатации могут изменяться осевые нагрузки и скорости движения поездов. Практические выводы, получаемые по результатам расчета, служат основанием для составления плана усиления конструкции железнодорожного пути; определения продолжительности межремонтных схем и видов ремонтов, проводимых между капитальными ремонтами железнодорожного пути; анализа причин нарушений устойчивости рельсошпальной решетки и целостности подшпального основания, в том числе приведших к сходу подвижного состава [4, 5].

При определении показателей напряженно-деформированного состояния пути преобладающее влияние на итоговый результат расчета оказывает величина максимально вероятной динамической силы воздействия колеса на рельс, определяемая по формуле:

$$P_{\max}^{\text{дин}} = P_{\text{ср}} + \lambda_{\Phi} \cdot S, \quad (1)$$

где $P_{\text{ср}}$ — среднее значение вертикальной силы воздействия колеса подвижного состава на рельс (кг);

λ_{Φ} — вероятностный показатель, оценивающий риск возникновения максимальной динамической силы;

S — среднеквадратическое отклонение дополнительных динамических вертикальных сил инерционного характера, возникающих при взаимодействии пути и подвижного состава, при наличии длинных неровностей на пути, а также изолированных и непрерывных неровностей на поверхности катания колеса (кг).

Формулы по определению дополнительных динамических сил инерционного характера содержат ряд переменных и постоянных величин, характеризующих изменения условий эксплуатации: скорость движения V (км/ч); модуль упругости подрельсового основания U (кг/см²); коэффициент относительной жесткости основания k (см⁻¹); коэффициенты, учитывающие тип рельса β , род балласта γ , тип шпалы ϵ , а также величину приведенной массы железнодорожного пути α_0 и α_1 .

Коэффициент α_0 зависит от величин приведенной массы колеса m_k (кг·с²/см) и приведенной к контакту колеса и рельса массы пути $m_{\text{п}}$ (кг·с²/см):

$$\alpha_0 = \frac{m_k}{m_k + m_{\text{п}}}. \quad (2)$$

Для расчета напряжений в элементах конструкции пути в Методику заложены численные значения коэффициента α_0 , которые рекомендуется принимать равными 0,433 для пути на деревянных шпалах и 0,403 для пути на железобетонных шпалах.

Коэффициент α_1 рекомендуется принимать равным 1,0 для пути на деревянных шпалах, а для пути на железобетонных шпалах определять как отношение коэффициента $\alpha_0^{\text{жб.ш.}}$ к значению коэффициента $\alpha_0^{\text{д.ш.}}$:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_0^{\text{жб.ш.}}}{\alpha_0^{\text{д.ш.}}} = \frac{\frac{m_k}{m_k + m_{\text{п}}^i}}{\frac{m_k}{m_k + m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}}}} = \frac{m_k + m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}}}{m_k + m_{\text{п}}^i} = 0,931. \quad (3)$$

Обоснование о введении в инженерный расчет величин всех коэффициентов, учитывающих приведенную массу железнодорожного пути, было выполнено в 1972 году. Согласно исследованию М. Ф. Вериги и С. С. Крепкогорского [6], величина приведенной массы колеса m_k ($\text{кг} \cdot \text{с}^2/\text{см}$) определяется как отношение массы колеса q (кг) к ускорению свободного падения $g = 9,81$ ($\text{см}/\text{с}^2$):

$$m_k = \frac{q}{g}. \quad (4)$$

Приведенная масса пути $m_{\text{п}}$, в свою очередь, определялась как сумма масс рельсошпальной решетки $m_{\text{ршр}}^0$, балластного слоя $m_{\text{б}}^0$ и слоя того объема грунта земляного полотна $m_{\text{гр}}^0$, который совершал вертикальные колебания под действием поездной нагрузки:

$$m_{\text{п}} = m_{\text{ршр}}^0 + m_{\text{б}}^0 + m_{\text{гр}}^0. \quad (5)$$

Для определения указанных величин были использованы результаты экспериментального исследования Е. М. Бромберга, выполненного в 1958 году при движении четырехосного вагона со скоростью 100 км/ч на конструкции пути с рельсами Р50, деревянными шпалами и щебеночным балластным слоем толщиной 45 см.

Очевидно, что со времени проведения эксперимента в 1958 году и теоретического исследования в 1972 году произошли значительные изменения условий эксплуатации. К основным изменениям можно отнести повышение средней массы рельса на сети железных дорог с 49,6 до 64,7 кг/м, повышение доли бесстыкового пути на железобетонных шпалах с 5 до 83 % от развернутой длины железных дорог, применение совершенно новых видов креплений, изменение характера силового воздействия (осевой нагрузки с 23–25 до 25–27 тс, массы поездов с 2337 до 4105 т и средней грузонапряженности с 24 до 39 млн т брутто и др.) [7–11].

В настоящее время вибродинамическое взаимодействие пути и подвижного состава имеет иной характер, чем 50–60 лет назад, следовательно, и показатели, учитывающие это взаимодействие (коэффициенты α_0 и α_1), должны принимать другие значения.

Рассмотрим подробно методику расчета данных коэффициентов. Отношение (2) может быть записано так:

$$m_{\text{п}} = \frac{m_{\text{к}} \cdot (1 - \alpha_0)}{\alpha_0}. \quad (6)$$

Для данного выражения справедлива следующая функциональная зависимость (рис. 1).

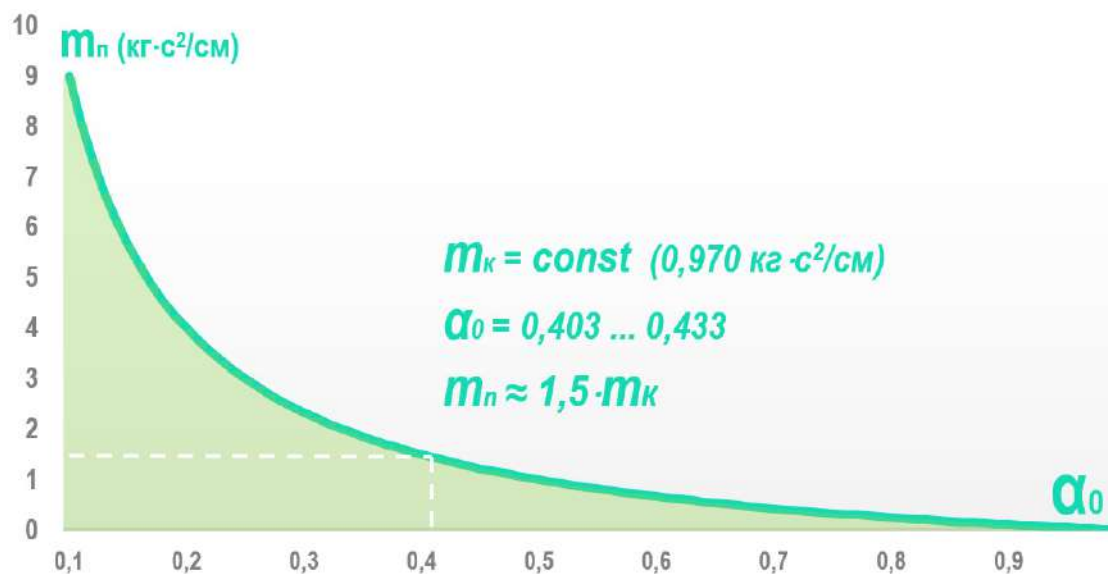


Рис. 1. Функциональная зависимость приведенной массы пути $m_{\text{п}}$ от коэффициента α_0 и приведенной массы колеса $m_{\text{к}}$

Из рис. 1 видно, что при α_0 от 0,403 до 0,433 приведенная масса пути $m_{\text{п}}$ приблизительно равна 1,5 приведенной массы колеса.

Предположим, что по некоторому участку, на котором уложены железобетонные шпалы, будет двигаться пассажирский электропоезд ЭС2Г «Ласточка» с массой колеса $q = 1188$ кг. Тогда приведенная масса пути при $\alpha_0 = 0,433$ будет равна $m_{\text{п}} = 1,79$ кг·с²/см.

В случае если по этому участку будет двигаться грузовой электровоз 2ЭС6 «Синара» с массой колеса $q = 3519$ кг, приведенная масса пути составит $m_{\text{п}} = 5,29$ кг·с²/см.

Следовательно, величина параметра $m_{\text{п}}$ зависит только от приведенной массы колеса $m_{\text{к}}$ и не зависит от каких-либо других эксплуатационных условий. При любом значении α_0 увеличение/уменьшение значения параметра $m_{\text{к}}$ повлечет за собой увеличение/уменьшение значения $m_{\text{п}}$.

Это означает, что коэффициент α_0 не учитывает реальные значения масс элементов конструкции пути и подвижного состава, вовлекаемые в колебательный процесс вследствие взаимодействия пути и подвижного состава.

Рассмотрим результаты экспериментального исследования фактического вибрационного воздействия на грунты земляного полотна от инновационных вагонов с нагрузкой 27 т/ось, проведенного сотрудниками ФГБОУ ВО ПГУПС на участке Баранчинская — Лая Свердловской железной дороги [12].

Конструкция пути имеет следующую характеристику: звеньевой путь (25 м), деревянные шпалы, рельсы Р65, крепления ДО, эпюра 1840 шт./км, балласт асбестовый толщиной 40 см.

Земляное полотно представляет собой насыпь высотой 6 м, сложенную из щебня гранитных пород фракцией от 10 до 40 мм, суглинка коричневого цвета полутвердой консистенции с редким гравием плотностью 1,87 т/м³ и коричневатожелтой супесью плотностью 2,19 т/м³ с гравием до 25 %, галькой и остатками растительности.

На участке массового обращения грузовых поездов с осевой нагрузкой до 27,0 т и скоростью 30–70 км/ч были зафиксированы значения амплитуд на уровне основной площадки земляного полотна в интервале от 38 до 191 мкм (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Максимальные результирующие амплитуды смещений на основной площадке земляного полотна

Период испытаний	Средние результирующие, максимально вероятные амплитуды смещений, мкм							
	Поезда с осевой нагрузкой 23,5 т/ось				Поезда с осевой нагрузкой 27,0 т/ось			
	Скорость движения, км/ч				Скорость движения, км/ч			
	30–40	40–50	50–60	60–70	30–40	40–50	50–60	60–70
I главный путь, вне стыка								
Ноябрь 2017 года	88			131	84			
Май 2018 года	84		115	147	90			
Июнь 2018 года	88		122	156	95			
II главный путь, зона стыка								
Ноябрь 2017 года	124	146	191		129			
Май 2018 года	93		121	135	103			
Июнь 2018 года	126		166	186	136			
III главный путь, вне стыка								
Ноябрь 2017 года	38	58	74	101	40			
Май 2018 года	63	75	88		57			
Июнь 2018 года	73	84	96		62			

В соответствии с полученными результатами для поперечного профиля участка проведения исследования по аналитическим выражениям И. В. Прокудина [13] были построены изолинии распространения амплитуд колебаний в теле земляного полотна при значениях на уровне основной площадки земляного полотна, равных

60, 100, 140 и 180 мкм (рис. 2 — при 100 мкм). Минимальные значения амплитуд (0,0001 мкм) были зафиксированы на расстоянии 28 м от оси II главного пути, по которому двигалась поездная нагрузка, и на глубину до 8 м от уровня основной площадки земляного полотна.

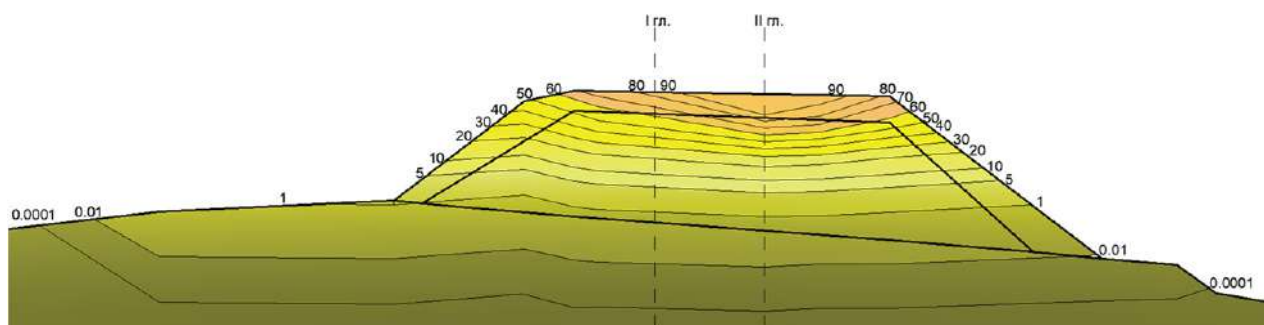


Рис. 2. Распределение изолиний результирующих амплитуд колебаний грунтов в теле земляного полотна при максимально вероятных результирующих амплитудах на уровне основной площадки земляного полотна 100 мкм

В соответствии с [14, 15] приведенная масса земляного полотна может быть определена как сумма приведенных масс слоев грунта земляного полотна, имеющих одинаковые значения вертикальных перемещений:

$$m_{\text{п}} = \frac{1,5}{g \cdot k \cdot z_0^2} \cdot \left(\sum_{i=-\infty}^{\infty} p_i \cdot z_i^2 \right), \quad (7)$$

где z_0^2 — вертикальное перемещение зоны контакта колеса и рельса (см);
 z_i^2 — вертикальное перемещение каждого элемента железнодорожного пути (см);
 g — ускорение свободного падения (см/с);
 k — коэффициент относительной жесткости подрельсового основания (см⁻¹);
 p — плотность грунта (кг/см).

Заменим величины, учитывающие вертикальные перемещения зоны контакта колеса и рельса, параметром R , тогда формула примет вид:

$$m_{\text{п}} = R \cdot \left(\sum_{i=-\infty}^{\infty} p_i \cdot z_i^2 \right). \quad (8)$$

По результатам расчета было получено (рис. 3), что при изменении амплитуды колебаний на уровне основной площадки земляного полотна приведенная масса земляного полотна изменяется в 3,7 раза.

Следовательно, коэффициенты α_0 и α_1 , введенные для учета приведенной массы пути, не могут быть строго детерминированными величинами, а должны представлять собой функциональные зависимости, учитывающие факторы, влияющие на ее формирование (табл. 2).



Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний на уровне основной площадки земляного полотна A (мкм) от величины R , учитывающей вертикальное перемещение точки (площадки) контакта колеса и рельса

ТАБЛИЦА 2. Объективные и субъективные факторы, подтверждающие вариативность приведенной массы железнодорожного пути

Объективные факторы	Субъективный фактор
Изменение очертания поперечного профиля земляного полотна и балластной призмы, как типового, так и фактического	Различным поперечным сечениям пути при одинаковом силовом воздействии должна соответствовать различная приведенная масса пути
Различие геометрических параметров элементов конструкции рельсошпальной решетки	
Изменение структуры и свойств материалов, составляющих балластную призму и земляное полотно	
Наличие в конструкции пути вновь введенных, дополнительных элементов: геоматериалов, вяжущих веществ, новых видов различных подкладок и прокладок (разнослойность)	
Изменяющиеся со временем показатели интенсивности грузовой работы (грузонапряженность и пропущенный тоннаж)	
Изменения состояния элементов конструкции верхнего строения пути, характеризующее наличие отступлений, деформаций, дефектов и засорения и загрязнения элементов конструкции пути	
Влияние качества ремонта и работ текущего содержания пути	
Изменение геометрических параметров ходовых частей (ползуны, навары, выбоины, неравномерность проката и др.)	Одному и тому же поперечному сечению пути при различном силовом воздействии должна соответствовать различная приведенная масса пути
Конструктивные особенности неподдресоренных частей экипажа	
Изменение режима движения поезда (ускорение, торможение, равномерное движение)	
Изменение характера силового воздействия (масса и длина поезда, осевая нагрузка)	
Расширение спектра реализуемых скоростей	
Изменение технических характеристик экипажа, увеличение силы тяги, а также переход на различные силы тяги (тепловозная, электрическая, электромагнитная)	
Изменения системы технического обследования парка вагонов	
Влияние погодных условий (температура, осадки и др.)	

Поскольку, согласно Методике, коэффициент α_1 для пути на железобетонных шпалах определяется как отношение коэффициента $\alpha_0^{\text{жб.ш.}}$ к значению $\alpha_0^{\text{д.ш.}}$, то для практических расчетов целесообразно вводить переменное значение коэффициента α_0 . Тогда коэффициент α_1 будет определяться как отношение коэффициента α_0^i для расчетной конструкции пути к значению $\alpha_0^{\text{д.ш.}}$, принятому для пути на деревянных шпалах:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_0^{\text{жб.ш.}}}{\alpha_0^{\text{д.ш.}}} = \frac{\frac{m_k}{m_k + m_{\text{п}}^i}}{\frac{m_k}{m_k + m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}}}} = \frac{m_k + m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}}}{m_k + m_{\text{п}}^i} \quad (9)$$

Следует подчеркнуть, что для данного выражения при любых значениях коэффициента $\alpha_1^{\text{жб.ш.}}$ справедливо следующее решение:

$$m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}} = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} = -m_k \quad (10)$$

После ряда математических преобразований выражение (9) можно записать в следующем виде:

$$m_k \cdot (\alpha_1^{\text{жб.ш.}} - 1) = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} - \alpha_1^{\text{жб.ш.}} \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}} \quad (11)$$

Подставим в данное выражение значения коэффициента $\alpha_1^{\text{жб.ш.}}$ от 0 до n и найдем решение каждого неравенства (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Зависимость коэффициента $\alpha_1^{\text{жб.ш.}}$ от вариативности приведенных масс железнодорожного пути на железобетонных шпалах $m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$, железнодорожного пути на деревянных шпалах $m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}}$ и массы неподрессоренных частей тележки подвижного состава m_k

$\alpha_1^{\text{жб.ш.}}$	Уравнение	Решение
	$m_k \cdot (\alpha_1^{\text{жб.ш.}} - 1) = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} - \alpha_1^{\text{жб.ш.}} \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$	
$\alpha_1^{\text{жб.ш.}} = 0$	$m_k \cdot (0 - 1) = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} - 0 \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$ $-m_k = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}}$ $m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}}$	$-m_k = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}}$
$\alpha_1^{\text{жб.ш.}} = 0,5$	$m_k \cdot (0,5 - 1) = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} - 0,5 \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$ $-0,5 \cdot m_k = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} - 0,5 \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$ $0,5 \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}} = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} - 0,5 \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$	$-m_k = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} = m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$

Окончание ТАБЛИЦЫ 3

$\alpha_1^{\text{жб.ш.}}$	Уравнение	Решение
$\alpha_1^{\text{жб.ш.}} = 1$	$m_k \cdot (1-1) = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} - 1 \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$ $0 = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} - 1 \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$ $0 = m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}} - m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$	$m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} = m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$
$\alpha_1^{\text{жб.ш.}} = 2$	$m_k \cdot (2-1) = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} - 2 \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$ $1 \cdot m_k = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} - 2 \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$ $-m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}} = m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}} - 2 \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$	$-m_k = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} = m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$
$\alpha_1^{\text{жб.ш.}} = n$	$m_k \cdot (n-1) = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} - n \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$ $n \cdot m_k - m_k = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} - n \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$ $-n \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}} + m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}} = m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}} - n \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$	$-m_k = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} = m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}$

Рассмотрим случай при значении $m_k = G$ кг·с²/см, значительно превышающем действительные значения приведенной массы колеса подвижного состава, и $\alpha_1^{\text{жб.ш.}} = 0,931$ (в соответствии с Методикой [1]):

$$\alpha_1^{\text{жб.ш.}} \cdot m_k - m_k = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} - \alpha_1^{\text{жб.ш.}} \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}, \quad (12)$$

$$0,931 \cdot G - G = m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} - 0,931 \cdot m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}}.$$

Решение равенства возможно только при $m_{\text{п}}^{\text{д.ш.}} = m_{\text{п}}^{\text{жб.ш.}} = -G = -m_k$.

Из вышеизложенного следует, что выражение (9) не имеет физического смысла. Величина коэффициента α_1 , учитываемая в Методике, не имеет зависимости от колеблющихся масс пути и подвижного состава.

Заключение

Проведенный анализ аналитических выражений, регламентированных действующей Методикой оценки воздействия подвижного состава на путь, позволяет сделать ряд выводов относительно физической обоснованности коэффициентов α_0 и α_1 , введенных для учета приведенной массы пути.

Анализ функциональной зависимости, связывающей коэффициент α_0 с приведенной массой колеса m_k и приведенной массой пути $m_{\text{п}}$, показывает, что при фиксированном значении коэффициента α_0 , заложенном в Методику, величина $m_{\text{п}}$ оказывается жестко детерминированной исключительно значением m_k . Это позволяет

предположить, что в существующей постановке коэффициент α_0 не в полной мере отражает влияние реальных физико-механических свойств и масс элементов конструкции пути (рельсошпальной решетки, балласта и грунтов земляного полотна), вовлекаемых в колебательный процесс. Верификация данного положения на примере современных верифицированных значений масс колеса различного подвижного состава демонстрирует значительный разброс вычисляемой величины m_n , что ставит под сомнение возможность использования унифицированных постоянных значений α_0 .

Исследование выражения для определения коэффициента α_1 выявило, что при подстановке любых допустимых значений исходных параметров решение математического выражения (9) неизменно приводит к равенству приведенных масс пути на деревянных и железобетонных шпалах. Данный математический инвариант свидетельствует о том, что заложенная в Методику функциональная связь не позволяет уловить разницу в динамическом взаимодействии системы «путь — подвижной состав» при смене типа шпал. Следовательно, физический смысл коэффициента α_1 как параметра, призванного учитывать изменение колеблющихся масс пути в зависимости от его конструкции, требует дополнительного уточнения и обоснования, поскольку в текущем виде решение не зависит от варьируемых условий.

Таким образом, полученные результаты дают основание полагать, что применяемые в настоящее время постоянные значения коэффициентов α_0 и α_1 , а также методика их расчета не в полной мере отражают современный уровень вибродинамического воздействия и реальную величину приведенной массы пути, участвующей во взаимодействии с подвижным составом. Выявленные особенности указывают на необходимость проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований с целью корректировки данных коэффициентов или разработки более совершенных методов их определения, учитывающих вариативность эксплуатационных факторов и конструктивных особенностей современной железнодорожной инфраструктуры.

Список источников

1. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности, утв. МПС РФ от 16.06.2000 № ЦПТ-52/14. М., 2000. 40 с.
2. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности, утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 № 270бр.
3. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго [и др.] // Труды ВНИИЖТ. М.: Трансжелдориздат, 1955. Вып. 97. 412 с.
4. Клинов С. И. Расчеты верхнего строения пути на прочность и устойчивость: учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта. М.: МИИТ, 1984. 115 с.

5. Чернышев М. А. Практические методы расчета пути. М.: Транспорт, 1967. 236 с.
6. Вериго М. Ф. Динамические исследования пути и корректировка правил расчетов железнодорожного пути на прочность // Труды ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1972. Вып. 466. 192 с.
7. Транспорт и связь СССР: стат. сборник. М.: Статистика, 1972. 320 с.
8. Транспорт и связь СССР: стат. сборник. М.: Финансы и статистика, 1990. 137 с.
9. Транспорт в России: стат. сборник. М.: Росстат, 2022. 101 с.
10. Транспорт в России: стат. сборник. М.: Росстат, 2024. 100 с.
11. Железнодорожный путь: учебник. Изд. 2-е, испр. и доп. / под ред. Е. С. Ашпиз. М.: ФГБОУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2021. 576 с.
12. Отчет о научно-исследовательской работе «Оценка влияния составов, сформированных из вагонов с осевой нагрузкой 27 тс, на состояние высоких насыпей на участке Качканар — Смычка Свердловской железной дороги». СПб.: ПГУПС, 2018. 157 с.
13. Прокудин И. В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: дисс. ... д-ра техн. наук. Л., 1982. 456 с.
14. Шмидт К. М. Влияние массы пути на деформацию его при ударе колеса с подрессоренным грузом: сб. НИИ пути и путевого хозяйства. М.: Трансжелдориздат, 1941. С. 87–109.
15. Антонов А. Ю. Об определении приведенной массы пути. Путь XXI века: сб. трудов V Национальной научно-практической конференции с международным участием (Санкт-Петербург, 14–15 сентября 2023 года) / под ред. Л. С. Блажко. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024. С. 114–121.

Дата поступления: 20.01.2026

Решение о публикации: 28.02.2026

Контактная информация:

АНТОНОВ Антон Юрьевич — старший преподаватель кафедры «Железнодорожный путь»;
antonov@pgups.ru

БЛАЖКО Людмила Сергеевна — профессор кафедры «Железнодорожный путь»;
blazhko@pgups.ru

Physical interpretation of the railway track's equivalent mass coefficients in track strength calculations

A. Yu. Antonov, L. S. Blazhko

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Antonov A. Yu., Blazhko L. S. Physical interpretation of the railway track's equivalent mass coefficients in track strength calculations // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 45–57. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-45-57. (In Russian)

Abstract

Objective: to determine the necessity to adjust the constant values of α_0 and α_1 coefficients, specified in the “Methodology for Assessing the Impact of Rolling Stock on the Track Under Conditions of Ensuring Its Reliability” (hereinafter referred to as the Methodology). **Methods:** an analysis of the analytical expressions employed in the Methodology and in the results of an experimental study of the oscillatory process in the subgrade soils, arising from track-rolling stock interaction, was conducted. **Results:** a functional dependence of the equivalent track mass (m_{track}) on α_0 coefficient and the equivalent wheel mass m_{wheel} has been obtained. It has been established that the analytical expressions, utilized to determine α_1 coefficient, lack physical significance, since they produce the same solution for any α_1 value, confirming that m_{track} is not influenced by the specific interaction mechanism between the track and the rolling stock. **Practical significance:** in view of the substantial changes in operational conditions affecting track-rolling stock interaction, since α_0 and α_1 coefficients were introduced in the 1972 Methodology for calculating the stress-strain state of the track, the research findings indicate the necessity to revise both the numerical values of these parameters and the methodologies employed to determine them.

Keywords: railway track, track-rolling stock interaction, impact of wheel-rail vertical forces, track strength calculation, reduced track mass, α_0 and α_1 coefficients

References

1. Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti, utv. MPS RF ot 16.06.2000 No. TsPT-52/14. M., 2000. 40 s. (In Russian)
2. Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti, utv. rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 22.12.2017 No. 2706r. (In Russian)
3. Vzaimodejstvie puti i podvizhnogo sostava / M.F. Verigo [i dr.] // Trudy VNIIZhT. M.: Transzheldorizdat, 1955. Vyp. 97. 412 s. (In Russian)
4. Klinov S. I. Raschety verkhnego stroeniya puti na prochnost' i ustojchivost': uchebnoe posobie dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta. M.: MIIT, 1984. 115 s. (In Russian)
5. Chernyshev M. A. Prakticheskie metody rascheta puti. M.: Transport, 1967 g. 236 s. (In Russian)
6. Verigo M. F. Dinamicheskie issledovaniya puti i korrrektirovka pravil raschetov zheleznodorozhnogo puti na prochnost' // Trudy VNIIZhT. M.: Transport, 1972. Vyp. 466. 192 s. (In Russian)
7. Transport i svyaz' SSSR: stat. sbornik. M.: Statistika, 1972. 320 s. (In Russian)
8. Transport i svyaz' SSSR: stat. sbornik. M.: Finansy i statistika, 1990. 137 s. (In Russian)
9. Transport v Rossii: stat. sbornik. M.: Rosstat, 2022. 101 s. (In Russian)

10. Transport v Rossii: stat. sbornik. M.: Rosstat, 2024. 100 s. (In Russian)
11. Zheleznodorozhnyj put': uchebnik. Izd. 2-e, ispr. i dop. / pod red. E. S. Ashpiz. M.: FGBOU DPO "Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte", 2021. 576 s. (In Russian)
12. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote "Otsenka vliyaniya sostavov, sformirovannykh iz vagonov s osevoj nagruzkoj 27 ts, na sostoyanie vysokikh nasypej na uchastke Kachkanar — Smychka Sverdlovskoj zheleznoj dorogi". SPb.: PGUPS, 2018. 157 s. (In Russian)
13. Prokudin I. V. Prochnost' i deformativnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna iz glinistykh gruntov, vosprinimayushchikh vibrodinamicheskuyu nagruzku: diss. ... d-ra tekhn. nauk. L., 1982. 456 s. (In Russian)
14. Shmidt K. M. Vliyanie massy puti na deformatsiyu ego pri udare koleasa s podressorennym gruzom: sb. NII puti i putevogo khozyajstva. M.: Transzheldorizdat, 1941. S. 87–109. (In Russian)
15. Antonov A. Yu. Ob opredelenii privedennoj massy puti. Put' XXI veka: sb. trudov V Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (Sankt-Peterburg, 14–15 sentyabrya 2023 goda) / pod red. L. S. Blazhko. SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2024. S. 114–121. (In Russian)

Received: 20.01.2026

Accepted: 28.02.2026

Author's information:

Anton Yu. ANTONOV — Senior Lecturer at the Department of "Railway Track"; antonov@pgups.ru

Lyudmila S. BLAZHKO — Professor at the Department of "Railway Track"; blazhko@pgups.ru

УДК 629.45

Сравнительный анализ причин внеплановых ремонтов пассажирских вагонов

И. А. Вишняков, Д. Г. Евсеев

Российский университет транспорта (МИИТ), Россия, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Вишняков И. А., Евсеев Д. Г. Сравнительный анализ причин внеплановых ремонтов пассажирских вагонов // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 58–66. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-58-66

Аннотация

Цель: провести сравнительный анализ причин внеплановых текущих отцепочных ремонтов (ТОР) пассажирских вагонов для выявления закономерностей выхода из строя элементной базы в зависимости от интенсивности эксплуатации. **Методы:** статистический анализ данных о проведении ТОР для двух групп вагонов, дифференцированных по интенсивности использования: «умеренное» (до 600 тыс. км и/или 3 года) и «интенсивное» (2 года независимо от пробега). Использовались методы диаграммы Парето для выявления главных неисправностей, а также расчет удельной частоты возникновения неисправностей и коэффициента интенсивности отказов. **Результаты:** установлено, что вагоны с интенсивной эксплуатацией требуют проведения внепланового ремонта в среднем в 1,6 раза чаще (в расчете на один вагон), чем вагоны с умеренным использованием. Выявлены основные причины браковки: дефекты поверхности катания колесных пар (выщербина, круговой наплыв, равномерный прокат) и необходимость технологической замены масла в редукторе. Показано, что характер и частота неисправностей существенно зависят от режима эксплуатации. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют собственникам и операторам подвижного состава прогнозировать потребность в запасных частях и производственных ресурсах для проведения ТОР, оптимизировать логистику ремонтов. На основе анализа предложено разработать дифференцированную систему контроля зарождения и развития эксплуатационных дефектов на поверхности катания колесных пар, оптимизировать технологические операции и развивать бортовую диагностику для перехода к ремонту по фактическому состоянию.

Ключевые слова: пассажирский вагон, внеплановый ремонт, текущий отцепочный ремонт (ТОР), пробег, возраст вагона, эффективность эксплуатации

Введение

Повышение эффективности использования пассажирских вагонов локомотивной тяги актуально в сфере выполнения услуг по перевозке пассажиров как с точки зрения экономической целесообразности и алгоритма проведения технического обслуживания и ремонта (ТОиР), так и для обеспечения безопасности движения, надежности и качества перевозочной деятельности в целом. Для исследования интенсивности возникновения неисправностей в узлах, деталях и агрегатах пассажирских вагонов проведен их сравнительный анализ от постройки до достижения первого планового ремонта с умеренным (пробег менее 600 тыс. км и достижение 3 лет) и с интенсивным (календарный период 2 года без ограничения пробега) использованием [1]. Данное сравнение позволит выявить закономерность выхода из

стройка элементной базы пассажирских вагонов в зависимости от интенсивности их использования.

Одним из основных показателей привлекательности использования пассажирского вагона является его эргономичность, которая выражена в обеспечении комфортных условий перевозки и надежности, позволяющих путешествовать строго в соответствии с заложенным графиком движения. Выполнение этих показателей требует от владельца подвижного состава поддерживать состояние пассажирских вагонов на высоком техническом уровне, а также повышать долговечность элементной базы путем использования наиболее надежных узлов, деталей и агрегатов [3].

Именно поэтому каждый случай отказа оборудования, требующий проведения текущего отцепочного ремонта (ТОР), в итоге ведет к экономическим потерям и снижению эффективности использования вагона по назначению.

Статистический анализ показывает, что большинство неисправностей носит эксплуатационный характер, то есть возникает в результате естественных износов элементов [5]. Значит, данные неисправности ремонтируются за счет ресурсов собственника или оператора подвижного состава.

Для того чтобы определить потребность в необходимом количестве запасных частей и материалов с целью обеспечения высокого уровня эффективности использования каждой единицы подвижного состава, собственник заинтересован в получении информации о планируемом (прогнозируемом) количестве и периоде попадания вагона во внеплановый ремонт [6, 7]. Эта информация будет также полезна для того, чтобы собственник пассажирского вагона повысил надежность элементной базы, запланировал необходимый запас или перешел на более надежные аналоги.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования установлены две группы пассажирских вагонов с различной интенсивностью использования:

1. *Умеренное использование.* В данную группу отнесены вагоны, достигшие максимально допустимого периода использования до проведения планового ремонта (3 года). Общее количество вагонов составляет 246 единиц со средней интенсивностью использования 429 км/сут.

2. *Интенсивное использование.* В данную группу по результатам анализа истории использования пассажирских вагонов за исследуемый период [2] отнесены вагоны с интенсивным пробегом (до 1 140 700 км) и достижением календарного периода 2 года с момента изготовления [1]. Общее количество вагонов составляет 624 единиц со средней интенсивностью использования 946 км/сут.

Данная статистика показывает, что вагонов с интенсивным использованием более чем в 2,5 раза больше, чем с умеренным, при этом они эксплуатируются в 2,21 раза интенсивнее.

Проведение статистического анализа осуществлялось на основе данных курсирования вагонов с момента постройки до проведения первого деповского ремонта с анализом архивных данных за более чем 10 лет [2].

Анализ получен на основании:

– фиксации проведения ТОР выявленных неисправностей в результате визуального и инструментального контроля при проведении технического обслуживания поездов (в объеме ТО-1) на станциях формирования (расформирования), назначения и в пунктах оборота [1];

– фиксации сверхнормативных значений инфраструктурными (КТИ, КТСМ и т. д.) и бортовыми внутривагонными (СКДУ, «Хранитель» и т. д.) диагностическими системами.

В качестве методологии сформированы предложения по повышению надежности оборудования пассажирских вагонов, а также прогноза интенсивности попадания вагонов на позиции ТОРа по наиболее многочисленным неисправностям с вводом показателя «удельная частота возникновения неисправности», выраженная как среднее количество фактов проведения внеплановых ремонтов на один вагон по каждому типу неисправности. По результатам работы рассчитан коэффициент интенсивности отказов в зависимости от интенсивности пробега вагона в исследуемом интервале. Используемые в работе термины и определения соответствуют действующим стандартам [4]. Методология учитывает подходы к установлению назначенных сроков службы элементной базы [8], а также современные тенденции цифровизации процессов технического обслуживания, направленные на повышение прозрачности и эффективности управления парком [10].

Результаты исследования

Проведенный анализ случаев браковки вагонов для устранения внеплановых неисправностей при проведении текущего отцепочного ремонта (ТОР) с построением диаграммы Парето (рис. 1) показал, что в область необходимости принятия первоочередных мер и выработки мероприятий по ним попали следующие неисправности:

– дефекты на поверхности катания колесной пары (выщербина, круговой наплыв и равномерный прокат);

– технологическая необходимость замены масла в редукторе от средней части оси колесной пары.

Наиболее характерные и многочисленные неисправности узлов, агрегатов и деталей пассажирских вагонов, которые требуют проведения вагону текущего отцепочного ремонта, структурированы в табл. 1. Полученные данные коррелируют с методами оценки остаточного ресурса [6].

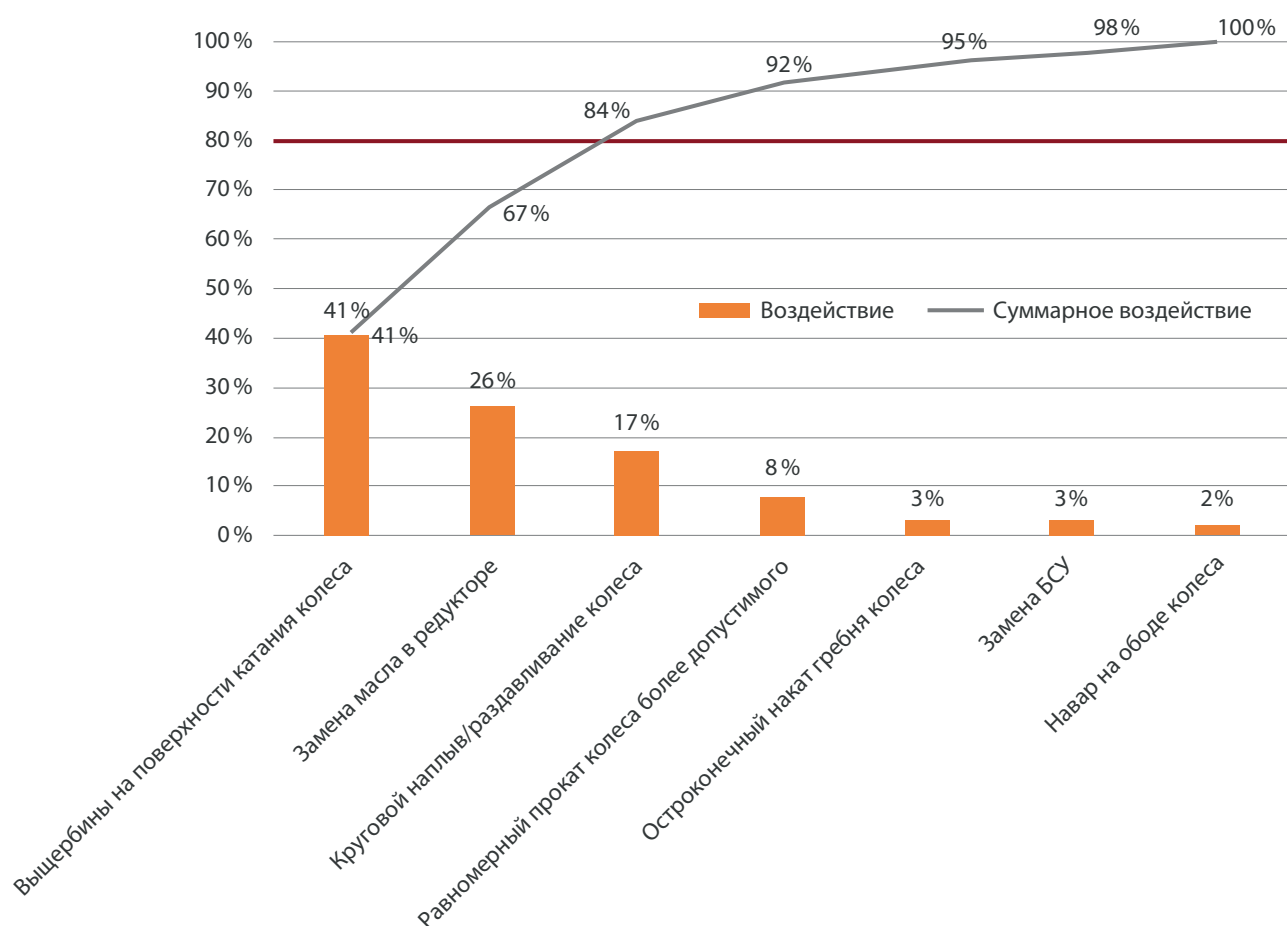


Рис. 1. Диаграмма распределения фактов проведения внепланового ремонта по типам неисправностей

ТАБЛИЦА 1. Распределение наиболее многочисленных неисправностей пассажирских вагонов, требующих проведения ТОР

Причина отцепочных ремонтов	Количество отцепочных ремонтов	
	Группа 1. Умеренное использование (246 вагонов)	Группа 2. Интенсивное использование (624 вагона)
Выщербина на поверхности катания колесной пары (к/п)	166 (37%)	766 (41%)
Равномерный прокат к/п более допустимого	80 (18%)	101 (5%)
Круговой наплыв/раздавливание (к/п)	43 (10%)	352 (19%)
Навар на поверхности катания (к/п)	12 (3%)	35 (2%)
Замена масла (истечение срока) в редукторе от средней части оси	102 (23%)	501 (27%)
Остроконечный накат на гребне (к/п)	21 (5%)	59 (3%)
Замена безззорного сцепного устройства (БСУ)	21 (5%)	39 (2%)
Всего неисправностей	445	1853

Для приведения к абсолютным показателям потребности браковки пассажирских вагонов в ТОР введем понятие «удельная частота возникновения неисправности, требующей внепланового ремонта» как отношение количества выявленных неисправностей к общему количеству проанализированных вагонов соответствующей группы. Результаты приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Удельная частота возникновения неисправностей вагонов, требующих проведения внепланового ремонта

№	Причина неисправности	Группа 1. Умеренное использование (246 вагонов)	Группа 2. Интенсивное использование (624 вагона)	Удельная частота браковки
1	Выщербина на поверхности катания к/п	0,68	1,23	1,82
2	Замена масла (истечение срока)	0,42	0,80	1,94
3	Круговой наплыв / раздавливание к/п	0,18	0,56	3,22
4	Равномерный прокат к/п более допустимого	0,33	0,16	0,5
5	Остроконечный накат гребня к/п	0,09	0,10	1,12
6	Замена БСУ	0,09	0,06	0,74
7	Навар на ободке к/п	0,05	0,06	1,14
Среднее значение		0,26	0,42	1,61

Отношение общих количеств ремонтов ($1853 / 445 \approx 4,16$) показывает, что в абсолютном выражении группа «интенсивное использование» потребовала в 4,2 раза больше внеплановых ремонтов, чем группа «умеренное использование». Однако для оценки влияния именно интенсивности эксплуатации ключевым является среднее отношение удельных частот (1,61), которое свидетельствует, что каждый вагон интенсивной группы в среднем в 1,6 раза чаще попадает во внеплановый ремонт по рассматриваемым причинам [7]. Разница между показателями (4,16 и 1,61) объясняется тем, что в интенсивной группе изначально в 2,5 раза больше вагонов, и при этом каждый из них выходит из строя чаще.

В результате проведенного анализа установлено, что вагоны группы «интенсивное использование» подвержены браковке для проведения им ТОР в 1,6 раза чаще (в расчете на один вагон), чем вагоны группы «умеренное использование». Наиболее интенсивная браковка осуществляется из-за наличия дефектов на поверхности катания колесных пар (круговой наплыв/раздавливание, выщербина, навар и остроконечный накат), а также по необходимости проведения технологической операции — замены масла в редукторе от средней части оси. При этом вагоны группы «умеренное использование» показали повышенную интенсивность браковки по наличию равномерного проката на поверхности катания колесной

пары, а также необходимости проведения технологической операции по замене беззазорного сцепного устройства на автосцепку СА-3.

Проведенное исследование позволяет констатировать, что в зависимости от интенсивности использования вагонов возникают две потребности проведения внепланового ремонта вагонам: технологическая — смена масла и перестановка узла БСУ/СА-3; эксплуатационная — образование дефектов на поверхности катания колесных пар, таких как выщербина (в основном связана с циклическими ударными воздействиями «стык — колесо», усугубляемыми резким перепадом температур наружного воздуха на полигонах) и равномерный прокат (естественный процесс износа поверхности катания в зависимости от интенсивности использования).

Выводы

В результате проведенного анализа установлено, что вагоны группы «интенсивное использование» подвержены браковке для проведения им ТОР в 1,5 раза чаще (в расчете на один вагон), чем вагоны группы «умеренное использование». При этом общее количество внеплановых ремонтов в интенсивной группе в 4,2 раза выше из-за большего размера парка и повышенной частоты отказов.

Проведенный сравнительный анализ показывает, что основными причинами внепланового ремонта являются образование эксплуатационных дефектов на поверхности катания колесных пар, а также рост необходимости проведения технологических операций (смена масла редуктора и замена сцепных устройств), что требует от собственника (оператора) подвижного состава принимать профилактические меры по обеспечению необходимого технологического запаса и/или производственного ресурса для поддержания эффективности использования парка.

Для обоснованного применения этих профилактических мер следует в первую очередь разработать дифференцированную систему контроля зарождения и развития эксплуатационных дефектов на поверхности катания колесных пар, а также внедрить материалы с увеличенным сроком службы, оптимизировать технологические операции и развивать бортовую диагностику для перехода к ремонту по фактическому состоянию.

Список источников

1. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотрику вагонов) № 808–2022 ПКБ ЦВ: утв. Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества протоколом от 08.12.2022 № 77. 180 с.
2. Программа сбора статистики по истории ремонтов вагона на протяжении жизненного цикла: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619713, Российская Федерация / Шинкарук А. С., Вишняков И. А.; заявл. 07.04.2025; опублик. 17.04.2025.
3. РТМ. Нормируемые показатели надежности пассажирских вагонов локомотивной тяги / МПС России. М., 2002. 76 с.

4. ГОСТ 33943-2016. Надежность железнодорожного подвижного состава. Термины и определения: введ. 09.01.2017.

5. Клещевникова Е. Ю., Корнишина В. Н., Жатченко Я. В. Виды неисправностей и методы устранения на текущий отцепочный ремонт грузовых и пассажирских вагонов // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2025. Т. 1. С. 194–198.

6. Шинкарук А. С., Кульков А. А., Рафиков Р. Х. Повышение эффективности технического обслуживания пассажирского подвижного состава // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 4. С. 229–237.

7. Шинкарук А. С., Куликов М. Ю. Анализ влияния внепланового ремонта на эффективность использования пассажирского вагона // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2024. С. 445–452.

8. Совершенствование технического обслуживания и ремонта системы обеспечения комфорта пассажирских вагонов / Д. Г. Евсеев [и др.] // Наука и техника транспорта. 2023. № 3. С. 37–40.

9. Сергеев К. А., Кривич О. Ю., Руснак И. Н. Методика оценки потребительских свойств цельнокатаных колес пассажирских вагонов // Наука и техника транспорта. 2014. № 3. С. 39–45.

10. Иванова Е. А., Савенков Е. И. Цифровые платформы для повышения прозрачности процесса обслуживания железнодорожного подвижного состава // Экономика железных дорог. 2023. № 8. С. 65–70.

Дата поступления: 25.12.2025

Решение о публикации: 30.01.2026

Контактная информация:

ВИШНЯКОВ Иван Алексеевич — аспирант; dalisan5555@gmail.com

ЕВСЕЕВ Дмитрий Геннадьевич — д-р техн. наук, профессор; evseev dg@gmail.com

A comparative analysis of the causes underlying unscheduled repairs of passenger railway cars

I. A. Vishnyakov, D. G. Evseev

Russian University of Transport (MIIT), 9 Obraztsova str., Moscow, 127994, Russia

For citation: *Vishnyakov I. A., Evseev D. G. A comparative analysis of the causes underlying unscheduled repairs of passenger railway cars // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 58–66. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-58-66 (In Russian)*

Abstract

Objective: to compare the reasons underlying unplanned ongoing uncoupling repairs (OUR) in order to find trends in component failure depending on the operating intensity. **Methods:** statistical analysis on the implementation of OUR for two groups of railway cars, classified as “moderate” (up to 600,000 km and/or 3 years) and “intensive” (regardless of mileage, upon reaching 2 years) was conducted. Pareto diagramme analysis was used to identify the principal malfunctions, accompanied by calculations of specific failure frequencies and the failure intensity coefficient. **Results:** the findings showed that vehicles subjected to intensive use require unscheduled repairs, on average, 1.6 times more frequently per vehicle than those under moderate use. The predominant defect sources were wheelset surface damage, including shelling, circumferential welds, and uniform wear, and the requirement for technological oil replacement in the gearbox. The study demonstrates that both the character and frequency of failures are substantially influenced by operating conditions. **Practical significance:** the data obtained will help rolling stock owners and operators predict the need for spare parts and production resources required for MRS repairs, optimize repair logistics and anticipate the demand for production resources and spare components for OUR repairs. The research proposes developing a specialized system to monitor the emergence and development of operational defects on the wheelset’s surface, optimize technological processes, and install onboard diagnostic equipment that will facilitate a transition to condition-based maintenance easier.

Keywords: passenger railway car, unscheduled repair, ongoing uncoupling repair (OUR), mileage, railway car age, operational efficiency

References

1. Instruktsiya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu vagonov v ekspluatatsii (instruktsiya osmotrshchiku vagonov) no. 808–2022 PKB TsV: utv. Sovetom po zhelezodorozhnomu transportu gosudarstv — uchastnikov Sodruzhestva protokolom ot 08.12.2022 no. 77. 180 s. (In Russian)
2. Programma sbora statistiki po istorii remontov vagona na protyazhenii zhiznennogo cikla: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM no. 2025619713, Rossijskaya Federaciya / Shinkaruk A. S., Vishnyakov I. A.; zayavl. 07.04.2025; opubl. 17.04.2025. (In Russian)
3. RTM. Normiruemye pokazateli nadezhnosti passazhirskikh vagonov lokomotivnoj tyagi / MPS Rossii. M., 2002. 76 s. (In Russian)
4. GOST 33943-2016. Nadezhnost' zhelezodorozhnogo podvizhnogo sostava. Terminy i opredeleniya: vved. 09.01.2017. (In Russian)
5. Kleshchevnikova E. Yu., Kornishina V. N., Zhatchenko Ya. V. Vidy neispravnostej i metody ustraneniya na tekushchij ottsepochnyj remont gruzovykh i passazhirskikh vagonov // Nauchno-tehnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke. 2025. T. 1. S. 194–198. (In Russian)
6. Shinkaruk A. S., Kul'kov A. A., Rafikov R. Kh. Povyshenie effektivnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya passazhirskogo podvizhnogo sostava // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. No. 4. S. 229–237. (In Russian)
7. Shinkaruk A. S., Kulikov M. Yu. Analiz vliyaniya vneplanovogo remonta na effektivnost' ispol'zovaniya passazhirskogo vagona // Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov: materialy VIII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem / Omskij gos. un-t putej soobshcheniya. Omsk, 2024. S. 445–452. (In Russian)

8. Sovershenstvovanie tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta sistemy obespecheniya komforta passazhirsikh vagonov / D. G. Evseev [i dr.] // Nauka i tekhnika transporta. 2023. No. 3. S. 37–40. (In Russian)

9. Sergeev K. A., Krivich O. Yu., Rusnak I. N. Metodika otsenki potrebitel'skikh svoystv tsel'nokatanykh koles passazhirsikh vagonov // Nauka i tekhnika transporta. 2014. No. 3. S. 39–45. (In Russian)

10. Ivanova E. A., Savenkov E. I. Tsifrovye platformy dlya povysheniya prozrachnosti protsessa obsluzhivaniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava // Ekonomika zheleznikh dorog. 2023. No. 8. S. 65–70. (In Russian)

Received: 25.12.2025

Accepted: 30.01.2026

Author's information:

Ivan A. VISHNYAKOV — Postgraduate Student; dalisan5555@gmail.com

Dmitry G. EVSEEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; evseev dg@gmail.com

УДК 629.42-192(075)

Исследование неразрушающего контроля осей колесных пар подвижного состава на основе модели

Цзеи Шэнь, А. Е. Цаплин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шэнь Цзеи, Цаплин А. Е. Исследование неразрушающего контроля осей колесных пар подвижного состава на основе модели // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 67–80. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-67-80

Аннотация

Цель: исследование физических механизмов формирования изображений дефектов при магнитопорошковом контроле осей колесных пар. Исследование выполнено в рамках магнитостатической теории с ориентацией на применение методов машинного зрения для автоматизированной интерпретации результатов контроля. Работа направлена на систематический анализ влияния приповерхностных дефектов и условий намагничивания на распределение полей рассеяния магнитного потока (ПРМП), а также на установление аналитических связей между геометрией дефекта и параметрами магнитного отклика.

Методы: в условиях магнитостатического приближения на основе уравнений Максвелла и конститутивных соотношений ферромагнитных материалов построена трехмерная параметризованная физическая модель зоны контроля оси колесной пары подвижного состава. Модель учитывает геометрию объекта согласно техническим стандартам и описывает дефект как эквивалентный воздушный паз. Численное моделирование реализовано в среде MATLAB методом конечных элементов (МКЭ). Для минимизации влияния граничных условий предусмотрено расширение расчетной области за счет внешней воздушной среды. Оценка характеристик ПРМП проводилась на основе карт магнитной индукции и анализа поверхностных сканирующих кривых. **Результаты:** выявлены количественные зависимости характеристик локальных возмущений поля от глубины, ширины и ориентации дефектов. Установлено, что рост глубины дефекта вызывает монотонное увеличение пиковых значений магнитной индукции при сохранении стабильной локализации максимума. Изменение ширины дефекта преимущественно влияет на пространственную протяженность зоны рассеяния, в то время как варьирование ориентации приводит к возникновению выраженной асимметрии и перераспределению плотности магнитного потока. **Практическая значимость:** полученные закономерности формируют физическую базу для формализации признаков магнитопорошковых изображений (яркость, геометрические параметры индикаций). Результаты исследования могут быть использованы в качестве теоретического обоснования при проектировании интеллектуальных систем машинного зрения и разработке алгоритмов автоматического распознавания дефектов при техническом обслуживании подвижного состава.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, магнитопорошковый контроль, ось колесной пары, магнитостатическое моделирование, поле рассеяния магнитного потока, приповерхностные дефекты, метод конечных элементов, магнитная индукция, машинное зрение

Введение

Оси колесных пар относятся к числу наиболее ответственных несущих элементов подвижного состава, отказ которых непосредственно связан с риском тяжелых последствий для безопасности движения. В процессе эксплуатации оси

подвергаются многократным циклическим нагрузкам, что приводит к формированию приповерхностных усталостных дефектов в зонах концентрации напряжений. В связи с этим в системе технического обслуживания железнодорожного транспорта широко применяются методы неразрушающего контроля, регламентированные действующими нормативными документами, в том числе ГОСТ 34656-2020, где магнитопорошковый контроль (МПК) определен как арбитражный метод выявления поверхностных и приповерхностных дефектов ферромагнитных осей [1].

Высокая чувствительность магнитопорошкового контроля к дефектам с малой шириной раскрытия обусловила его широкое практическое применение при контроле новых и эксплуатируемых осей по ГОСТ 21105-87. Вместе с тем интерпретация результатов МПК в настоящее время в значительной степени основывается на визуальной оценке магнитопорошковых индикаций оператором [2]. Такой подход носит субъективный характер и ограничивает возможности формализации диагностических признаков, а также внедрения автоматизированных систем анализа результатов контроля.

В последние годы методы машинного зрения активно применяются для анализа магнитопорошковых изображений, включая задачи извлечения признаков и автоматизированного распознавания дефектов [3]. Однако магнитопорошковое изображение определяется распределением поля рассеяния магнитного потока, формируемого в области дефекта вследствие локального нарушения магнитной проницаемости материала. Без физически обоснованного анализа магнитного отклика дефектов выбор признаков изображения и построение алгоритмов распознавания часто носят эмпирический характер, что ограничивает надежность и интерпретируемость интеллектуальных методов [4].

В настоящей работе на основе магнитостатической теории разработана трехмерная параметризованная физическая модель МПК оси колесной пары с использованием численного моделирования в среде MATLAB, исследовано влияние геометрических параметров дефектов и режимов намагничивания на распределение полей рассеяния магнитного потока. Полученные результаты формируют теоретическую базу для создания систем интеллектуального НК и автоматизированного распознавания дефектов на основе методов машинного зрения.

Физические основы формирования магнитопорошкового изображения и характеристики поля рассеяния

Магнитопорошковый контроль применяется для обнаружения поверхностных и приповерхностных дефектов в ферромагнитных материалах; формирование изображения при этом обусловлено наличием поля рассеяния магнитного потока (ПРМП) в области дефекта. При намагничивании тела оси внешним магнитным полем в материале устанавливается магнитный поток. При наличии приповерхностных дефектов, таких как трещины, складки или задиры, последние могут

быть эквивалентно представлены как локальные области с пониженной магнитной проницаемостью [5]. Это приводит к нарушению непрерывности магнитной цепи и локальному увеличению магнитного сопротивления, вследствие чего магнитный поток вблизи дефекта отклоняется от основного направления и частично выходит за пределы материала, формируя на поверхности изделия и в ближней воздушной зоне неоднородное поле рассеяния.

Пространственный градиент поля рассеяния вызывает перемещение частиц магнитного порошка вдоль силовых линий магнитного поля и их накопление в области дефекта, что в конечном итоге приводит к образованию наблюдаемой магнитопорошковой индикации в виде характерных полос или скоплений.

В типичных условиях магнитопорошкового контроля осей колесных пар процесс намагничивания протекает достаточно медленно, что позволяет рассматривать магнитное поле в магнитоэстатическом приближении с пренебрежением вкладом токов смещения. В этом случае магнитное поле описывается уравнениями магнитоэстатики:

$$\nabla \cdot B = 0, \nabla \times H = J$$

и линейными конститутивными соотношениями:

$$B = \mu H, \mu = \mu_0 \mu_r,$$

где B — магнитная индукция (Тл),

H — напряженность магнитного поля (А/м),

J — плотность возбуждающего тока (А/м²),

μ_0 — магнитная проницаемость вакуума,

μ_r — относительная магнитная проницаемость материала.

Материал оси является ферромагнитным и характеризуется значением $\mu_r \gg 1$, тогда как для дефектной полости и внешней воздушной среды можно принять $\mu_r \approx 1$. Таким образом, резкий контраст магнитной проницаемости на границе «материал — воздух» является ключевым физическим условием возникновения поля рассеяния и формирования магнитопорошкового изображения.

Трещины выбраны в качестве базового объекта моделирования ввиду их критической значимости для безопасности эксплуатации и возможности точной геометрической параметризации. Физический механизм формирования ПРМП в зоне трещины обусловлен локальным нарушением непрерывности магнитного потока в области с низкой магнитной проницаемостью ($\mu \approx 1$).

Глубина дефекта является ключевым фактором, определяющим интенсивность магнитного отклика. Рост глубины увеличивает магнитное сопротивление участка и объем вытесняемого в воздушную среду потока, что ведет к монотонному росту пиковых значений магнитной индукции над зоной повреждения.

Ориентация дефекта относительно вектора намагничивания детерминирует топологию и симметрию распределения ПРМП. Максимальный магнитный отклик и симметрия поля достигаются при расположении дефекта перпендикулярно линиям индукции. Отклонение от нормали вызывает выраженную асимметрию поля рассеяния, что является важным классификационным признаком при визуальном анализе.

Ширина раскрытия дефекта преимущественно коррелирует с пространственной протяженностью зоны возмущения магнитного поля. Увеличение ширины ведет к расширению области ПРМП при вторичном влиянии на амплитудные значения индукции.

Таким образом, геометрические характеристики дефектов непосредственно определяют как интенсивность, так и пространственную структуру магнитного отклика. Количественная оценка этих взаимосвязей требует разработки параметрической магнитоэстатической модели для систематического численного анализа типовых дефектных состояний.

Магнитоэстатическое моделирование и численное исследование дефектных магнитных полей при магнитопорошковом контроле осей

Для перехода к автоматизированной интерпретации результатов магнитопорошкового контроля на базе искусственного интеллекта разработана параметризованная магнитоэстатическая модель зоны контроля оси колесной пары подвижного состава. Целью моделирования является установление количественных зависимостей между геометрией дефектов и характеристиками полей рассеяния для формирования информативного признакового пространства нейронных сетей.

Трехмерная модель, реализованная в среде MATLAB, включает фрагмент тела оси, воздушный домен и эквивалентный объем дефекта. Исследование сфокусировано на наиболее критичных приповерхностных протяженных несплошностях (усталостных трещинах и задирах), к которым метод МПК обладает максимальной чувствительностью. Дефекты типа пористости или неметаллических включений в рамках данной модели не рассматриваются.

Для обеспечения воспроизводимости и управляемости численного анализа дефект описывается вектором геометрических параметров:

$$P = [h, w, l, \theta, z_0],$$

где $h \in [0, 2; 2, 0]$ мм — варьируемая глубина несплошности, охватывающая диапазон мелких и средних приповерхностных дефектов;

$w = 0,1$ мм — эквивалентная ширина раскрытия;

$l = 10$ мм — осевая протяженность дефекта;

θ и z_0 — угол ориентации и положение дефекта относительно оси изделия соответственно.

Параметрическое пространство сформировано с учетом минимизации краевых эффектов: размеры дефекта значительно меньше области контроля, а его локализация исключает влияние граничных условий расчетной сетки. Уровни намагничивания заданы значениями магнитодвижущей силы $NI \in \{200, 400, 600\}$ А·витков, что соответствует режимам, принятым в промышленной дефектоскопии железнодорожного транспорта.

Основной расчетной величиной для формирования признаков машинного зрения является распределение магнитной индукции B на поверхности оси и в прилегающей воздушной области. Ключевое значение имеет нормальная компонента B_n (далее B_z , где ось z совпадает с внешней нормалью к поверхности), так как именно она определяет условия осаждения магнитного порошка.

На основе анализа распределения B_z выделяются следующие количественные дескрипторы:

- пиковая амплитуда ($B_z \text{ max}$): максимальное значение нормальной компоненты индукции;
- пространственные характеристики: ширина распределения на полувысоте (FWHM) или площадь области, ограниченной изолиниями заданного уровня;
- градиентные и симметричные показатели: коэффициенты асимметрии профиля, отражающие наклон или глубину залегания дефекта.

Для установления количественных корреляций «дефект — отклик» анализируются одномерные профили B_z вдоль сканирующих траекторий. Полученные зависимости формируют физический базис для векторизации признаков и подготовки синтетических наборов данных для обучения алгоритмов машинного зрения.

Геометрической основой исследования служит ось колесной пары типа RF₂ (стандарт ТВ/Т 1010-2016) [6]. Локальная трехмерная модель включает расчетный участок оси, прилегающий воздушный домен и область дефекта. Для минимизации краевых эффектов дефект располагается на значительном удалении от осевых границ модели. Размеры воздушной области выбраны из условия аппроксимации бесконечного пространства (условия дальнего поля).

Физические допущения и свойства материалов

Материал оси принят как однородная ферромагнитная среда с постоянной магнитной проницаемостью ($\mu = \text{const}$), что позволяет сфокусироваться на топологии полей рассеяния.

Область дефекта моделируется как полость с магнитной проницаемостью, равной проницаемости вакуума (μ_0).

Параметризация: дефекты представлены в виде эквивалентных геометрических примитивов. Варьируемыми параметрами являются глубина, протяженность

и ориентация, что позволяет описывать широкий спектр линейных несплошностей (трещины, задиры, складки).

Построенная модель (рис. 1) обеспечивает инвариантность структуры расчетной сетки при параметрическом анализе, что гарантирует сопоставимость результатов при различных конфигурациях дефектов.

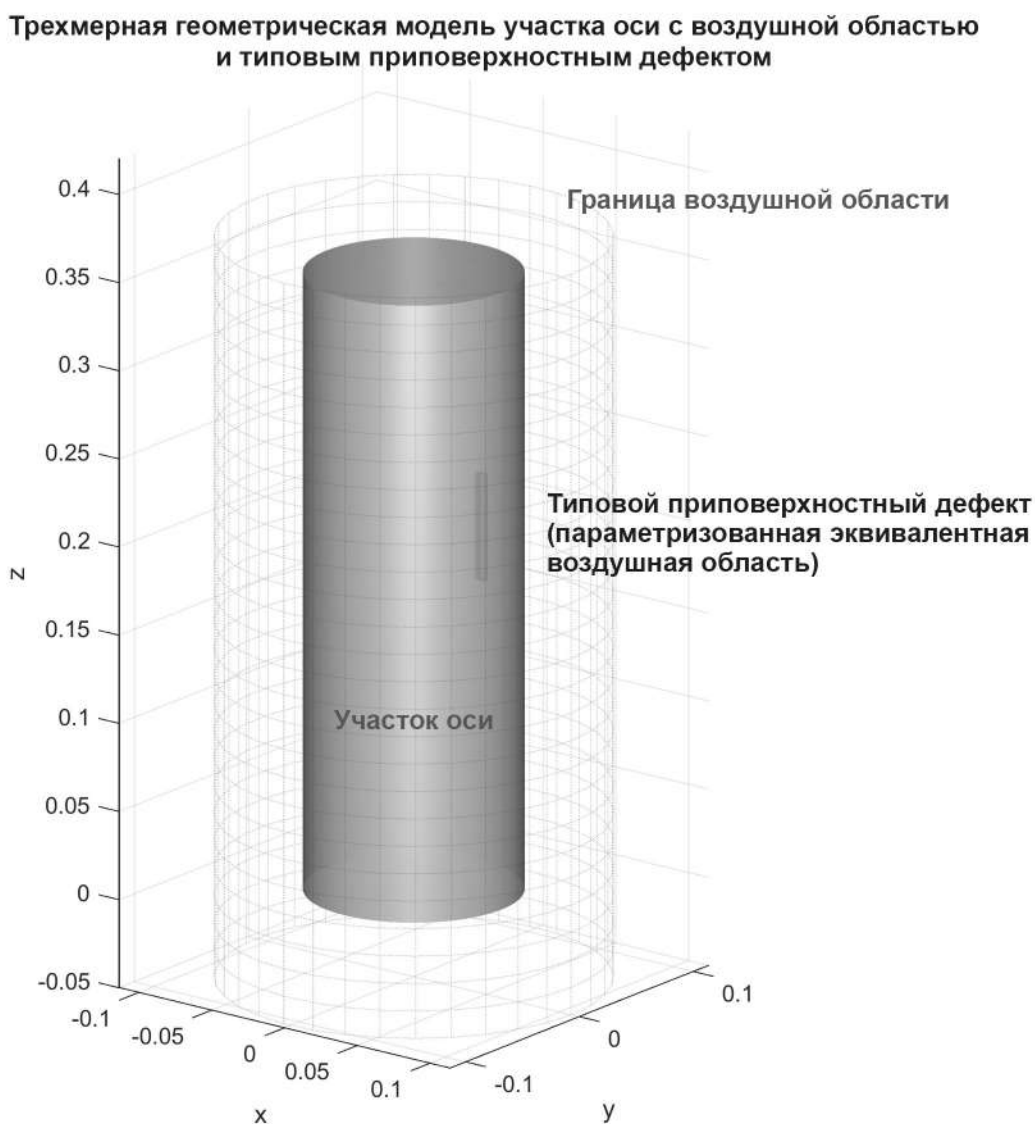


Рис. 1. Трехмерная геометрическая модель участка оси с воздушной областью и типовым приповерхностным дефектом

Для обоснования выбора признаков в системах машинного зрения проведен параметрический анализ магнитоэстатической модели оси серии RF. Исследовано влияние глубины дефекта d (от 0,2 до 2,0 мм) и величины магнитодвижущей силы (МДС) (200, 400 и 600 А·витков) на нормальную компоненту магнитной индукции B_z .

Анализ пространственной стабильности

Распределения B_z вдоль осевой траектории (рис. 2) характеризуются выраженным одиночным максимумом, локализация которого инвариантна относительно глубины дефекта и уровня намагничивания. Точное совпадение пика B_z max с геометрическим центром дефекта позволяет использовать данную координату как стабильный дескриптор положения несплошности для алгоритмов локализации.

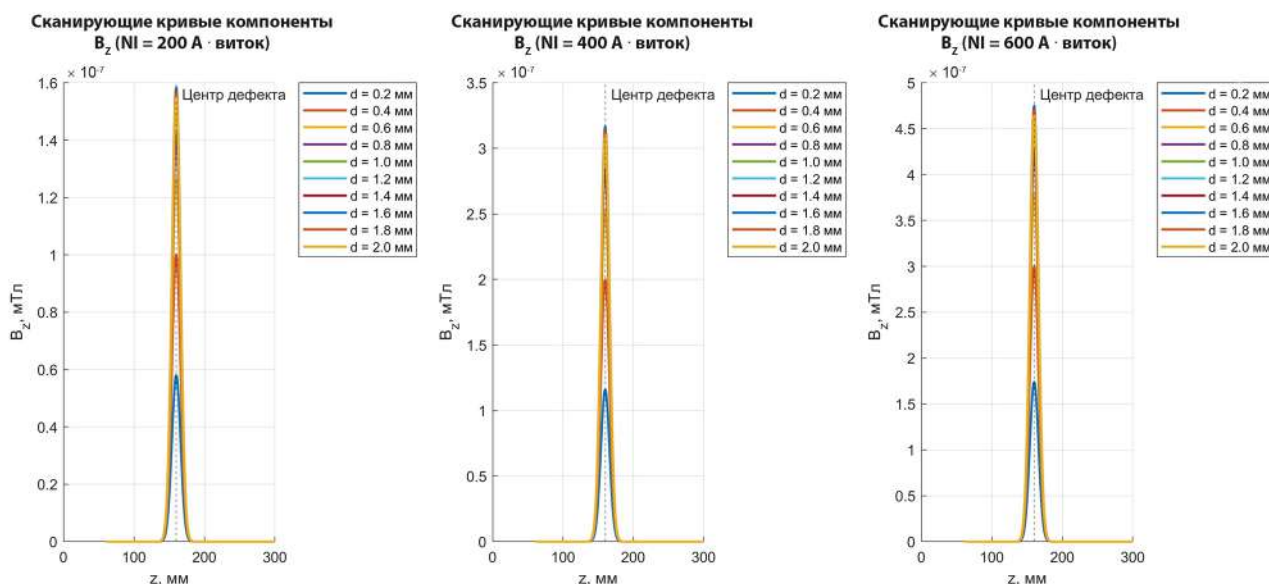


Рис. 2. Распределение нормальной компоненты магнитной индукции B_z вдоль поверхности оси при различных глубинах дефекта и уровнях намагничивания

Зависимость амплитудных характеристик

На основе анализа зависимостей $B_{\max} = f(d)$ (рис. 3) установлены следующие закономерности:

- влияние глубины: при всех уровнях намагничивания наблюдается монотонный рост B_z max при увеличении d (например, при МДС 200 А·витков амплитуда возрастает с $0,58 \cdot 10^{-7}$ Тл до $0,55 \cdot 10^{-7}$ Тл);
- характер роста: при малых глубинах ($d < 1,0$ мм) зависимость близка к линейной, тогда как при $d > 1,2$ мм темп роста снижается из-за перераспределения магнитных потоков в обход дефекта;
- влияние МДС: увеличение магнитодвижущей силы приводит к пропорциональному росту пиковых значений (до $4,65 \cdot 10^{-7}$ Тл при 600 А·витков и $d = 2,0$ мм) без изменения морфологии сигнала.

Стабильность пространственной формы отклика и прогнозируемая зависимость амплитуды от геометрических параметров дефекта подтверждают репрезентативность выбранных магнитных признаков. Эти данные формируют физический базис для векторизации дескрипторов и обучения нейросетевых классификаторов в задачах автоматизированного дефектоскопического контроля.

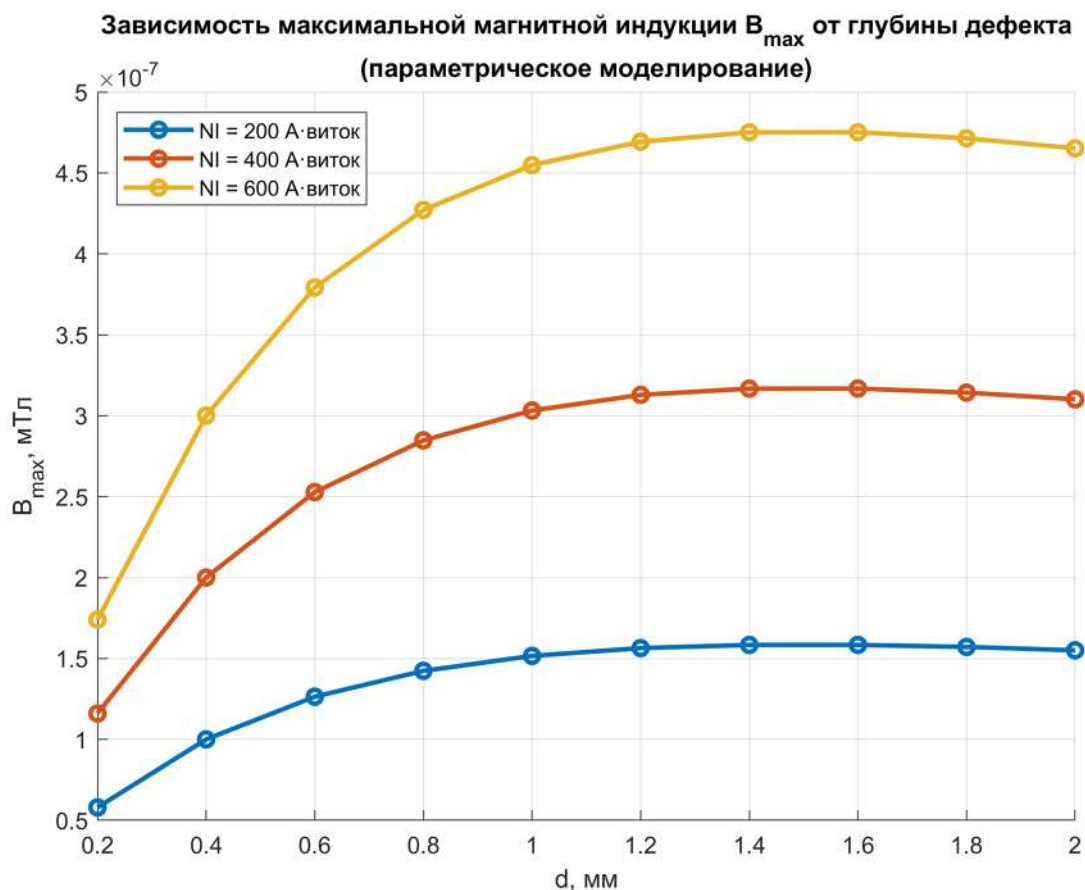


Рис. 3. Характеристика чувствительности амплитудного признака B_{\max} к изменению глубины дефекта

Алгоритмическое обеспечение системы машинного зрения для автоматизации МПК

Для реализации автоматизированного контроля осей колесных пар разработана система на базе алгоритмов глубокого обучения, адаптированная к специфике магнитопорошковых индикаций [7]. В отличие от традиционных методов визуального контроля, требующих высокой квалификации оператора, предлагаемый подход обеспечивает объективность и воспроизводимость результатов.

Процесс обработки данных включает следующие этапы:

- сбор данных: захват изображений зоны контроля при ультрафиолетовом освещении (для люминесцентного МПК);
- предобработка: нормализация яркости, подавление фоновых шумов и фильтрация бликов, характерных для металлических поверхностей осей;
- сегментация: выделение потенциальных зон дефектов на основе морфологических признаков и физических параметров поля рассеяния.

Ключевым этапом является векторизация признаков, базирующаяся на физической интерпретации магнитных полей. В качестве входных дескрипторов для нейронной сети используются как визуальные характеристики (геометрия

индикаторного следа, контрастность), так и параметры, полученные в ходе моделирования (амплитуда и пространственный масштаб B_z).

Использование комбинированных признаков — визуальных и физических — позволяет повысить устойчивость алгоритмов распознавания и эффективно различать реальные дефекты и ложные индикации, обусловленные геометрией детали, неоднородностью поверхности или неравномерностью нанесения магнитопорошковой суспензии [8]. Для решения задач классификации и локализации дефектов применяются методы машинного обучения, в частности архитектуры сверточных нейронных сетей, широко используемые в системах автоматизированного анализа изображений и продемонстрировавшие высокую эффективность в аналогичных задачах дефектоскопии.

Эффективность алгоритмов машинного зрения в задачах МПК напрямую зависит от репрезентативности обучающих выборок, формирование которых в натурных условиях сопряжено с высокими эксплуатационными затратами. Магнитостатическое моделирование используется как источник систематизированных данных и физически интерпретируемых дескрипторов. Это позволяет реализовать синтетическое расширение выборок и задать априорные ограничения при обучении нейросетей. Таким образом, моделирование выступает связующим звеном между физикой процесса и методами глубокого обучения, обеспечивая высокую устойчивость и интерпретируемость интеллектуальных систем диагностики.

В процессе магнитопорошкового контроля степень накопления магнитного порошка в зоне дефекта определяется распределением магнитного поля в приповерхностной области. В качестве базовой физической величины анализа используется нормальная к поверхности компонента магнитной индукции B_z (Тл), параметры которой позволяют установить физически обоснованное соответствие между характеристиками поля рассеяния и признаками магнитопорошкового изображения по интенсивности, пространственному масштабу и форме распределения.

В области над дефектом нормальная компонента магнитной индукции принимает локальные максимальные значения. Максимальное значение магнитной индукции определяется как

$$B_{\max} = \max_s B_z(s), [\text{Тл}],$$

где s — координата вдоль осевого направления оси (м).

На уровне магнитопорошкового изображения область повышенной концентрации магнитного порошка соответствует участкам увеличенной яркости. Для предварительно обработанного изображения с распределением интенсивности $I(x, y)$ и областью-кандидатом дефекта Ω максимальное значение яркости определяется как

$$I_{\max} = \max_{(x,y) \in \Omega} I(x, y).$$

Результаты численного моделирования показывают, что при увеличении глубины дефекта или уровня намагничивания величина B_{\max} демонстрирует устойчивый монотонный рост, которому соответствует увеличение I_{\max} на уровне изображения. Это позволяет рассматривать B_{\max} как физическую основу формирования яркостных признаков магнитопорошкового изображения и использовать его при выборе пороговых критериев в алгоритмах машинного зрения.

Пространственная протяженность поля рассеяния определяет масштабные характеристики магнитопорошковой индикации. На основе осевой зависимости $B_z(s)$ вводится показатель полуширины на уровне половины максимума (FWHM), определяемый как

$$W_B = s_2 - s_1, [\text{м}],$$

где координаты s_1 и s_2 удовлетворяют условию

$$B_z(s_1) = B_z(s_2) = \frac{1}{2} B_{\max}, s_1 < s_2.$$

Аналогичным образом для магнитопорошкового изображения по одномерному профилю яркости $g(s)$ вводится масштабный признак

$$W_I = s'_2 - s'_1, [\text{пиксели или м}],$$

где

$$g(s'_1) = g(s'_2) = \frac{1}{2} I_{\max}.$$

Численные результаты показывают, что изменение W_B отражает степень пространственного распространения поля рассеяния и на уровне изображения проявляется в изменении ширины магнитопорошковой полосы или площади связанной области индикации. Тем самым устанавливается физическая связь между величинами W_B и W_I , используемая при формировании масштабных признаков изображения.

Ориентация дефекта относительно направления намагничивания влияет на симметрию распределения поля рассеяния. Для количественного описания данного эффекта вводится показатель симметрии распределения нормальной компоненты магнитной индукции

$$S_B = \frac{\int_{s_0-\Delta}^{s_0} B_z(s) ds}{\int_{s_0}^{s_0+\Delta} B_z(s) ds},$$

где s_0 — координата максимального значения B_{\max} ,
 Δ — длина интервала интегрирования (м).

Аналогично для магнитопорошкового изображения показатель симметрии яркости определяется как

$$S_I = \frac{\int_{s_0-\Delta}^{s_0} g(s) ds}{\int_{s_0}^{s_0+\Delta} g(s) ds},$$

где $g(s)$ — одномерный профиль яркости изображения.

При совпадении ориентации дефекта с направлением намагничивания величины S_B и S_I близки к единице, что соответствует симметричной форме магнитопорошковой индикации. При изменении ориентации дефекта наблюдается отклонение показателей симметрии от единицы и формирование асимметричных распределений магнитного порошка. Это позволяет использовать показатели симметрии как физически интерпретируемые морфологические признаки при автоматизированном анализе магнитопорошковых изображений.

На основе результатов магнитостатического моделирования и установленных соответствий между физическими характеристиками поля рассеяния и признаками магнитопорошкового изображения процесс магнитопорошкового контроля, ориентированный на применение методов машинного зрения, может быть представлен в виде последовательности этапов:

- физическое и численное моделирование;
- получение и предварительная обработка изображений;
- извлечение физически обусловленных признаков;
- автоматизированная интерпретация результатов [9].

В рамках данного подхода результаты магнитостатического моделирования используются как источник априорных физических знаний для обоснованного отбора и интерпретации признаков изображения, а не как замена реальных процедур магнитопорошкового контроля. Это позволяет сократить долю эмпирических решений при разработке алгоритмов анализа изображений и повысить интерпретируемость и устойчивость автоматизированного распознавания дефектов.

Дополнительно информация о положении дефекта, его характерном масштабе и интенсивности магнитопорошковой индикации может быть интегрирована с системами визуальной поддержки, включая носимые средства отображения информации, что обеспечивает оперативное представление диагностических результатов и способствует повышению эффективности принятия инженерных решений при техническом обслуживании и контроле [10].

Заключение

В данной статье разработана параметризованная трехмерная магнитостатическая модель участка оси колесной пары, позволившая установить количественные закономерности формирования полей рассеяния в зависимости от геометрии дефектов и режимов намагничивания.

Основные результаты исследования:

1. Доказано, что приповерхностные несплошности генерируют воспроизводимые поля рассеяния, пиковая амплитуда которых монотонно возрастает с увеличением глубины дефекта и уровня намагничивающей силы. Инвариантность пространственной локализации магнитного отклика относительно параметров контроля обеспечивает высокую надежность обнаружения дефектов.

2. Анализ значений нормальной компоненты магнитной индукции B_z подтвердил наличие устойчивого экстремума в центре дефекта. Установленные корреляции между топологией поля и морфологией индикаторного следа позволяют заменить эмпирический выбор признаков физически обоснованной экстракцией дескрипторов для алгоритмов машинного зрения.

3. Результаты моделирования создают теоретический базис для синтетического расширения обучающих выборок и внедрения априорных физических ограничений в модели глубокого обучения. Это повышает устойчивость систем автоматизированного распознавания и способствует их интеграции в промышленные циклы контроля по аналогии с современными комплексами типа PARADES.

Список источников

1. ГОСТ 34656-2020. Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Методы неразрушающего контроля.
2. ГОСТ Р ИСО 9934-1-2011. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.
3. Шэнь Цзеи, Цаплин А. Е. Применение технологии неразрушающего контроля на подвижном составе и перспективы ее развития // Бюллетень результатов научных исследований. 2025. Вып. 1. С. 31–44.
4. Peng J., Zhang Q., Zhao B. Wheel and axle defect detection based on deep learning // Research and Review Journal of Nondestructive Testing. 2023. Vol. 1, no. 1.5.
5. Расширение области применения магнитопорошкового метода неразрушающего контроля / А. А. Белов [и др.] // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 10–1.
6. TB/T 1010-2016. Railway rolling stock. Wheelsets and bearings. Types and basic dimensions: industry standard of the People's Republic of China. Beijing, 2016.
7. Automatic defect identification method for magnetic particle inspection of bearing rings based on visual characteristics and high-level features / Y. Yang [et al.] // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, no. 3. P. 1293.
8. Михалев О. Н., Янюшкин А. С. Машинное зрение и распознавание объектов с помощью нейронных сетей // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Т. 10, № 2. С. 113–120.

9. A machine vision assisted system for fluorescent magnetic particle inspection of railway wheelsets / T. Ma [et al.] // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1706, no. 1. P. 150003.

10. Industrial application of ai-based assistive magnetic particle inspection / J. Baumeyer [et al.] // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, no. 4. P. 1499.

Дата поступления: 14.01.2026

Решение о публикации: 28.02.2026

Контактная информация:

ШЭНЬ Цзеи — аспирант; 787612109@qq.com

ЦАПЛИН Алексей Евгеньевич — канд. техн. наук, доцент; tsaplin.alexey@mail.ru

Model-based study of non-destructive testing for rolling stock wheelset axles

Jieyi Shen, A. E. Tsaplin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., 190031, Saint Petersburg, Russia.

For citation: Shen Jieyi, Tsaplin A. E. Model-based study of non-destructive testing for rolling stock wheelset axles // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 67–80. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-67-80 (In Russian)

Abstract

Objective: this paper aims to investigate mechanisms that generate defect signatures in magnetic particles inspection of wheelset axles. Framed within magnetostatic theory, the paper emphasizes the application of machine-vision techniques for automated interpretation of inspection results. It presents a systematic analysis of how surface defects and magnetization conditions influence the spatial distribution of magnetic flux leakage (MFL) and establishes analytical relationships between defect geometry and magnetic response metrics.

Methods: under the magnetostatic approximation, a three-dimensional parameterized physical model of the wheelset-axle inspection zone was developed based on Maxwell's equations and the constitutive relations of ferromagnetic materials. The model accounts for the object's geometry in accordance with relevant technical standards and represents defects as equivalent air gaps. Numerical simulations were performed in the MATLAB environment using the finite element method (FEM). To mitigate boundary condition effects, the computational domain was expanded to include the surrounding air. Characteristics of local magnetic-field disturbances were evaluated via magnetic induction maps and analysis of surface scanning profiles. **Results:** the findings have demonstrated quantitative relationships between the magnetic field disturbance characteristics and defect parameters, notably depth, width, and orientation of defects. The results indicate that a monotonic increase in the peak magnetic flux density with growing defect depth, while the position of the maximum remains stable. Variations in defect width primarily affect the spatial extent of the leakage-field region, whereas changes in defect orientation induce pronounced asymmetry and a redistribution of magnetic flux density. **Practical significance:** these observed regularities provide a physical basis for formalizing characteristics of magnetic particle indications (e.g. brightness and geometric parameters). The findings can serve as a theoretical foundation for the design of intelligent machine-vision systems and for the development of automated defect-recognition algorithms for rolling stock maintenance and inspection.

Keywords: non-destructive testing, magnetic particle inspection, railway axle, magnetostatic modelling, magnetic flux leakage field, surface defects, finite element method, magnetic induction, machine vision

References

1. GOST 34656-2020. Osi kolesnykh par zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Metody nerazrushayushchego kontrolya. (In Russian)
2. GOST R ISO 9934-1-2011. Kontrol' nerazrushayushchij. Magnitoporoshkovyj metod. (In Russian)
3. Shen' Tszei, Tsaplin A. E. Primenenie tekhnologii nerazrushayushchego kontrolya na podvizhnom sostave i perspektivy ee razvitiya // Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij. 2025. Vyp. 1. S. 31–44. (In Russian)
4. Peng J., Zhang Q., Zhao B. Wheel and axle defect detection based on deep learning // Research and Review Journal of Nondestructive Testin. 2023. Vol. 1, no. 1.
5. Rasshirenie oblasti primeneniya magnitoporoshkovogo metoda nerazrushayushchego kontrolya / A. A. Belov [i dr.] // Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk. 2015. No. 10–1. (In Russian)
6. TB/T 1010–2016. Railway rolling stock. Wheelsets and bearings. Types and basic dimensions: industry standard of the People's Republic of China. Beijing, 2016.
7. Automatic Defect Identification Method for Magnetic Particle Inspection of Bearing Rings Based on Visual Characteristics and High-Level Features / Y. Yang [et al.] // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, no. 3. P. 1293.
8. Mikhalev O. N., Yanyushkin A. S. Mashinnoe zrenie i raspoznavanie ob"ektov s pomoshch'yu nejronnykh setej // Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika. 2022. T. 10, no. 2. S. 113–120. (In Russian)
9. A machine vision assisted system for fluorescent magnetic particle inspection of railway wheelsets / T. Ma [et al.] // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1706, no. 1. P. 150003.
10. Industrial application of ai-based assistive magnetic particle inspection / J. Baumeyer [et al.] // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, no. 4. P. 1499.

Received: 14.01.2026

Accepted: 28.02.2026

Author's information:

Jieyi SHEN — Postgraduate Student; 787612109@qq.com

Alexey E. TSAPLIN — PhD in Engineering, Associate Professor; tsaplin.alexey@mail.ru

УДК 629.4.015:625.1.03

Особенности влияния кинематики вагона на сход подвижного состава при движении по стрелочным переводам

И. Ю. Ермоленко, Д. А. Ковенькин

Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

Для цитирования: Ермоленко И. Ю., Ковенькин Д. А. Особенности влияния кинематики вагона на сход подвижного состава при движении по стрелочным переводам // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 81–98. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-81-98

Аннотация

Исследование посвящено вопросам повышения безопасности движения поездов на сложных участках железнодорожного пути, включая горно-перевальные и станционные пути, с акцентом на систему «вагон — путь». **Цель:** выявление неочевидных причин и взаимосвязей, приводящих к сходам подвижного состава при прохождении стрелочных переводов. **Методы:** в исследовании применялся общий подход расследования схода подвижного состава, утвержденный нормативными документами ОАО «РЖД». Дополнительно для оценки динамических характеристик вагона был использован программный комплекс «Универсальный механизм». **Результаты:** было установлено, что локальные износы узлов вагона (например, автосцепки) способны создавать критические боковые усилия, приводящие к обезгруживанию колесной пары и риску схода. Рассмотрена проблема взаимодействия колесной пары и рельсового пути при нормированных значениях и получены графические зависимости боковых и вертикальных сил, возникающих в контакте «колесо — рельс». **Практическая значимость:** результаты работы позволяют по-новому взглянуть на проблему взаимодействия подвижного состава и пути с использованием новых понятий о внутренней и внешней кинематике вагона. Сделан вывод о существенном влиянии отклонений технического состояния отдельных узлов на безопасность движения, что послужит основой для разработки уточненной методики ее оценки.

Ключевые слова: безопасность движения, стрелочный перевод, грузовой вагон, автосцепка, сход подвижного состава, кинематика вагона

Введение

Безопасность движения поездов на железнодорожном транспорте является одной из важнейших функций перевозочного процесса ОАО «РЖД». В общем случае это свойство железнодорожной транспортной системы не создавать опасность жизни и здоровью людей, окружающей среде, техническим средствам и комплексам в процессе реализации перевозочного процесса. Нарушение данной функции называется железнодорожно-транспортным происшествием (ЖДТП) и имеет свою классификацию [1].

Распределение ЖДТП можно рассмотреть на примере работы Дирекции аварийно-восстановительных работ Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД), где это явление довольно часто проявляется [2–4]. Как видно из рис. 1, вероятность возникновения ЖДТП имеет периодический характер. В 2015–

2018 годах наблюдалось постепенное увеличение ЖДТП — это происходило из-за увеличения веса поездов и грузооборота на дороге. Далее, с вводом в эксплуатацию инновационных вагонов с повышенной осевой нагрузкой (2019–2021 годы), началось снижение количества ЖДТП. Однако в 2022–2023 годах происходит резкое увеличение ЖДТП, что обусловлено увеличением экспорта через порты Дальнего Востока (в том числе и сдвоенными поездами). При этом конструкция железнодорожного пути не претерпела существенных изменений, то есть надежность пути в 2015–2023 годах оставалась на одном уровне.

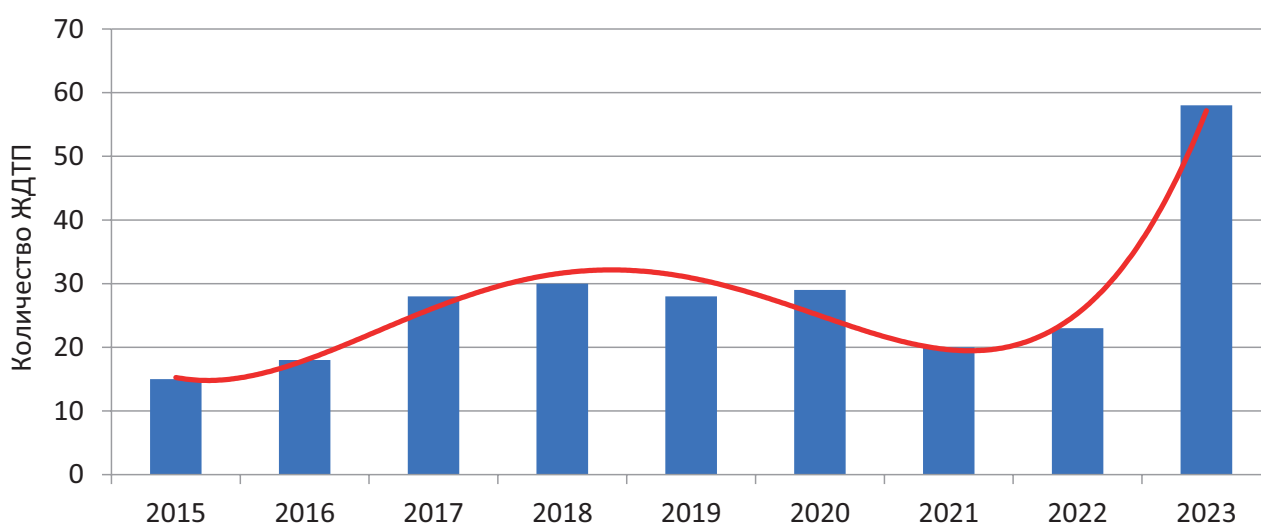


Рис. 1. Распределение ЖДТП на Восточно-Сибирской железной дороге

В основном ЖДТП — это классический сход вагона с рельсов, который проявляется как вкатывание гребня колеса на головку рельса или распираание рельсовой колеи [5]. В работе будет рассматриваться первый вид.

Вкатывание гребня колеса на головку рельса — это явление, при котором гребень колеса, перемещаясь по боковой рабочей грани рельса, достигает поверхности катания головки рельса и перекатывается через эту головку.

Совокупность событий, действий, причин или процессов, приведших к ЖДТП, представляет собой механизм ЖДТП (рис. 2).

В механизме рассматриваются основное событие (сход подвижного состава), причина (несоблюдение требований нормативных документов) и промежуточные события (причины-посредники), которые могут делиться на основные и дополнительные силовые факторы.

В зависимости от постановки задачи некоторые из них могут исключаться или наоборот включаться. Например, если в момент схода поезд находился в растянутом состоянии на прямом участке пути, то из механизма следует исключить соответствующие цепи (сверхнормативные продольные сжимающие усилия в поезде и конструктивные особенности рельсовой колеи).

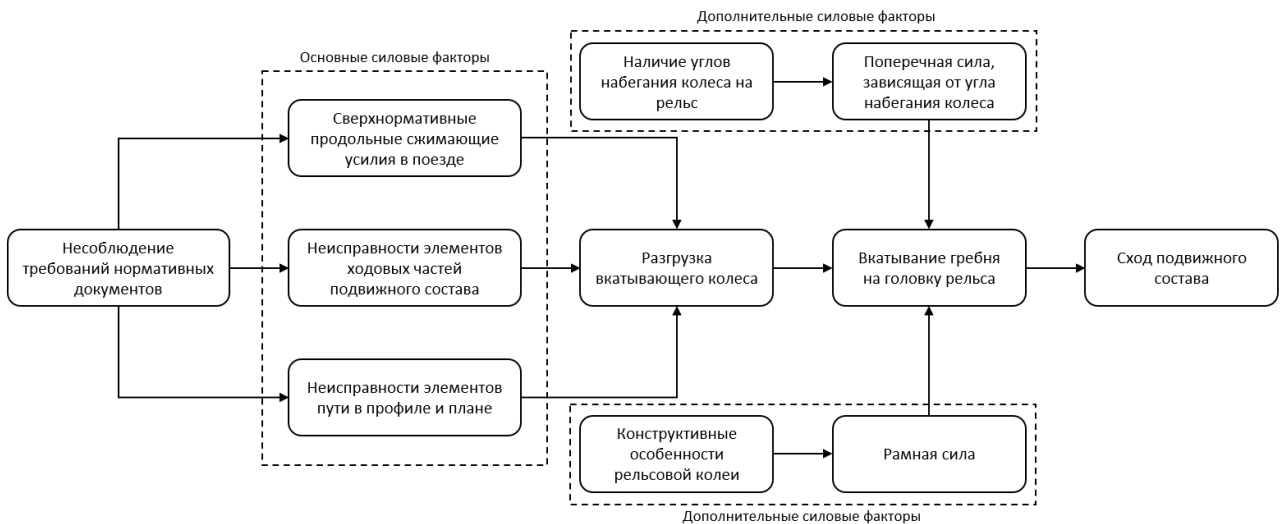


Рис. 2. Обобщенный механизм ЖДТП

Постановка задачи исследования

Рассмотрим механизм ЖДТП на примере схода подвижного состава, произошедшего на станции К ВСЖД.



Рис. 3. Схема схода вагонов на станции К

Во время захода поезда на станцию после прохождения стрелочного перевода №39 произошло вкатывание гребня колеса на головку рельса у 37-го с головы состава вагона, в сошедшем состоянии проследовал 134 м. Далее происходит столкновение с хвостовым вагоном соседнего состава.

Информация о составе: вес 3333 т, всего осей 212, локомотив серии 2ЭС5К, 53 вагона (формирование — 2 гр. + 7 пор. + 7 гр. + 2 пор. + 5 гр. + 4 пор. + 3 гр. + 9 пор. + 14 гр.). В соответствии со справкой по расшифровке файла КЛУБ-У локомотива скорость движения в голове и хвосте состава имеет разность ($V_{\text{голова}} = 11 \text{ км/ч}$ и $V_{\text{хвост}} = 25 \text{ км/ч}$).

Здесь в нарушение правил управления тормозами [6]:

– при отпуске тормозов на 404-м км машинист выдерживал вспомогательный тормоз локомотива в течение 101 с (при требовании 30–40 с); наполнение

тормозных цилиндров до 1,0–2,0 кгс произведено не одновременно с началом отпуска автоматических тормозов состава, а за 17 с до начала отпуска;

– при отпуске тормозов на 403-м км машинист выдерживал вспомогательный тормоз локомотива в течение 55 с (до последующего торможения с остановкой) при требовании 30–40 с; наполнение тормозных цилиндров до 1,0–2,0 кгс произведено не одновременно с началом отпуска автоматических тормозов состава, а за 6 с до начала отпуска.

Указанные действия с применением вспомогательного тормоза (переходе со спуска меньшей крутизны на спуск большей крутизны) в сочетании со следованием по стрелочному переводу на боковой путь (создающие дополнительное препятствие) способствовали сжатию состава с набеганием хвостовых груженных вагонов и последующим выталкиванием порожних вагонов, приходящихся на границу с груженной хвостовой группой.

Основная причина схода: обезгруживание правых колес первой по ходу движения тележки 38-го вагона из-за неправильной работы узла гашения колебаний и увеличенных износов узла «пятник — подпятник» с последующим их перекачиванием через правый контррельс стрелочного перевода №39.

С точки зрения эксплуатационной практики причина схода определена правильно (и обобщенно). Авторами статьи рассматривается систематизация факторов, приведших к данной причине схода: неправильная работа узла гашения колебаний и увеличенные износы узла «пятник — подпятник».

В исследовании будем опираться на работу авторов [7], где грузовой вагон рассматривается как сложная колебательная система и применяется новое понятие — «внутренняя кинематика вагона», но в самой работе оно не раскрыто.

В статье будут рассматриваться кинематика вагона как элемент сложной колебательной системы «локомотив — вагон — путь» и ее влияние на сход подвижного состава. Для этого разделим кинематику на внутреннюю — взаимодействие внутренних элементов механической системы «вагон» (узлов и деталей), и внешнюю — влияние внешней среды (рельсовый путь, локомотив, вагон) на механическую систему «вагон», оценив каждое взаимодействие по отдельности.

Влияние внутренней кинематики вагона

При проведении комиссионного осмотра сошедших вагонов были выявлены следующие неисправности:

1. 37-й вагон (фитинговая платформа мод. 13-9781):

– автосцепка, высота над уровнем головки рельса 1021 мм; на торце хвостовика в верхней части имеется местный износ размером 65 × 45 мм, глубиной 3 мм, наклеп на верхнюю горизонтальную поверхность хвостовика высотой до 3 мм;

– автосцепка, высота над уровнем головки рельса 1018 мм; на торце хвостовика в верхней части имеется местный износ размером 60×40 мм, глубиной 3 мм, наклеп на верхнюю горизонтальную поверхность хвостовика высотой до 3 мм.

2. 38-й вагон (фитинговая платформа мод. 13-9570):

– автосцепка, высота над уровнем головки рельса 1000 мм; просадка поглощающего аппарата АПЭ-90 38 мм;

– автосцепка, высота над уровнем головки рельса 1012 мм; невозвращение (подклинивание) в среднее положение после отклонения автосцепки в крайнее положение;

– высота и разница высот пружин рессорного комплекта 1 по ходу движения тележки, отклонение 9 мм.

В обычной ситуации, при движении с более высокой скоростью или в кривой, неисправность 5 может вызывать обезгруживание колесной пары, что приведет к вкатыванию гребня колеса на рельс. Однако в данном случае нужно обратить внимание на работу другого узла (автосцепного оборудования) и определить боковую силу (процент от продольной), действующую на вагон.

Вопросы моделирования продольных сил, возникающих между автосцепками соседних вагонов, рассматривались в работах [8, 9]. Боковую силу, действующую на вагон через автосцепные устройства, определим по формуле (1) в соответствии с ГОСТом [10]:

$$P_N = N \left[\frac{\delta L}{l_B^2} \cdot \left(1 + \frac{L}{a} \right) + \frac{L_c}{R} \right] \cdot \frac{l_B}{L}, \quad (1)$$

где N — величина продольной силы (Н);

δ — возможное одностороннее боковое перемещение узла «пятник — подпятник» за счет зазоров ходовых частей (м);

$2L$ — расстояние между задними опорными поверхностями упоров автосцепных устройств (м);

$2l_B$ — база вагона (м);

a — длина корпуса автосцепки (м);

$2L_c$ — длина вагона по осям сцепления (м);

R — радиус кривой (м).

Для исследуемого поезда весом до 4000 тс (3333 тс) распределение сил произошло следующим образом:

1. 37-й вагон — продольная сила $N_{37} = 3,49$ МН, боковая сила составила $P_{N37} = 759$ кН;

2. 38-й вагон — продольная сила $N_{38} = 3,58$ МН, боковая сила составила $P_{N38} = 771$ кН.

Критическая сила для четырехосного вагона составляет 3,5 МН. Это говорит о том, что при таком сочетании параметров возникает высокая вероятность либо повреждения автосцепки, либо выжимания впереди идущего вагона. Однако для более полной картины необходимо рассмотреть особенности конструкции железнодорожного пути на данном участке.

Влияние внешней кинематики вагона

Влияние внешней кинематики вагона будем рассматривать с двух позиций: локомотив и путь. Как было описано ранее, при движении по станционным путям машинист локомотива нарушил правила управления тормозами. Это вместе с разнородным составом привело к росту продольных усилий в составе, что могло повлечь либо обезгруживание колесной пары, либо выжимание тележки вагона с последующим набеганием колеса на рельс.

Если говорить о параметрах железнодорожного пути и их влиянии на возможность схода подвижного состава, то их достаточно большое множество [11].

Конструктивные особенности стрелочных переводов являются источником значительных динамических нагрузок, повышающих риск схода подвижного состава. В отличие от обычного пути, на коротком протяжении перевода (например, 31–35 м для марок 1/9 и 1/11 с рельсами Р65) наблюдается концентрация геометрических и упругих неровностей, которые вызывают ударные воздействия и ускоренный износ элементов конструкции [11, 12]. В данной работе анализируются специфические неровности, присущие стрелочным переводам, и их влияние на безопасность движения.

Уникальные неровности формируются в зонах стрелки и крестовины. При переходе колеса с рамного рельса на остряк происходит его опускание из-за более низкого расположения острия (вертикальная строжка) и уменьшения круга катания. Последующий подъем колеса при выравнивании высоты создаст вертикальную неровность глубиной до 2 мм. Аналогичные неровности при обратном переходе с острия на рамный рельс, усугубленные резким изменением ширины колеи и износом, могут достигать длины 550–850 мм и глубины 1,5–3,5 мм.

Наибольшую проблему представляют неровности в крестовине. При перекачивании с усовика на сердечник колесо, катящееся по уменьшающемуся кругу катания, опускается. Для предотвращения удара о торец сердечник выполнен с понижением (на 4 мм), а усовик — с подъемом (на 5,7 мм), что создает общий перепад уровней 9,7 мм. Траектория центра тяжести колеса образует значительную вертикальную неровность, характеристики которой зависят от износа как колесной пары, так и самой крестовины.

Геометрические неровности в горизонтальной плоскости

На стрелочных переводах неровности возникают не только в вертикальной, но и в горизонтальной плоскости. Естественно, что наличие неровностей в горизонтальной плоскости порождает внезапные дополнительные горизонтальные силы, имеющие нередко ударный характер.

В горизонтальной плоскости ключевым фактором является резкое изменение ширины колеи в пределах стрелки. Уширение колеи у острия остряка необходимо для обеспечения прохождения подвижного состава по стрелочному углу, но оно нарушает плавность хода.

Особую опасность представляет удар колеса об остряк при движении на боковой путь (противошерстное направление). Сила удара (F) пропорциональна квадрату скорости (v^2) и тангенсу угла удара ($\operatorname{tg}\alpha$): $F \sim v^2 \cdot \operatorname{tg}\alpha$ [13]. Угол удара, в свою очередь, зависит от зазора между гребнем колеса и рамным рельсом. Например, для перевода марки 1/11 уменьшение зазора с 30 мм до 0 сокращает угол удара в 1,5 раза. Большие ударные силы способны вызвать всползание гребня колеса на остряк, что непосредственно ведет к сходу. Для снижения рисков отводы контррельсов и усовиков выполняют с уположенными углами.

Помимо геометрических, существуют невидимые упругие неровности, проявляющиеся под нагрузкой. Их источниками служат:

- неравномерная подбивка переводных брусьев и переменная длина балластного основания;
- изменяющаяся жесткость пути из-за схождения и расхождения рельсовых нитей (жесткость под наружной нитью на 12–15 % ниже, чем под внутренней);
- наличие локальных жестких узлов (корень остряка, крестовина).

Резкие изменения модуля упругости (колеблющегося в пределах 85–150% от значения на основном пути) создают дополнительные динамические силы. Величина упругих просадок на переводах типа Р65 может достигать до 2 мм.

Подводя промежуточный итог можно сделать следующие выводы:

1. По внутренней кинематике вагона:
 - в сошедших вагонах присутствуют стандартные отклонения технического состояния, что во время движения может привести к обезгруживанию колесной пары.
2. По внешней кинематике вагона:
 - сход подвижного состава произошел после прохождения стрелочного перевода, где наличие неровностей может привести к точечному росту динамических нагрузок, которые, в свою очередь, приводят к обезгруживанию колесной пары;
 - разнородность состава вместе с отклонениями технического состояния вагона может привести к его выжиманию во время движения при несоблюдении режима торможения;
 - неправильные действия машиниста локомотива привели к возникновению сверхнормативных продольных усилий между 37-м и 38-м вагонами. Добавив

к этому обнаруженные в ходе осмотра вагонов следы смятия на корпусе смежных автосцепок в окне ударной розетки, можем получить обезгруживание колесной пары.

С практической точки зрения к сходу подвижного состава привело сочетание отклонений технического состояния вагонов и железнодорожного пути, а также влияние неправильного режима торможения локомотива. Однако по отдельности данные причины с низкой долей вероятности могут привести к сходу подвижного состава.

В настоящее время практически невозможно следить за каждым элементом системы «локомотив — вагон — путь» в реальном времени, поэтому расчеты и исследование причин схода подвижного состава производятся после наступления ЖДТП. Тем не менее современные программные комплексы моделирования динамики подвижного состава дают возможность при наличии исходных данных произвести математическое моделирование данного схода [14, 15].

Моделирование движения подвижного состава по стрелочному переводу марки 1/9 с учетом и без учета неисправностей геометрии рельсовой колеи

Сход произошел в крестовине стрелочного перевода № 39 при прохождении подвижного состава по боковому пути. Стрелочный перевод с рельсами типа Р65 (марка крестовины 1/9, правосторонний, номер проекта 2769.00.000), брусья железобетонные, балласт щебеночный. Продольный профиль представлен участком спуска с уклоном 3,3 %. Грузонапряженность 15,8 млн т·км брутто в год, пропущенный тоннаж на 01.01.2024 составлял 106,4 млн т брутто, на момент схода тоннаж составлял 107,72 млн т брутто. Установленная пассажирским и грузовым поездам скорость по прямому направлению — 80 км/ч, по боковому направлению — 40 км/ч. Масса сошедших платформ — 25,4 т.

Состояние геометрии рельсовой колеи на стрелочном переводе на момент схода следующее (данные взяты из акта промера технического состояния стрелочного перевода):

- ширина рельсовой колеи в стыке рамного рельса — 1528 мм, боковой износ рельсов — 1 мм, отклонение рельсовых нитей по уровню — 2 мм;
- ширина рельсовой колеи у острия остряков — 1531 мм, боковой износ рельсов — 1 мм, отклонение рельсовых нитей по уровню — 2 мм;
- ширина рельсовой колеи в корне остряков — 1526 мм, боковой износ рельсов — 1 мм, отклонение рельсовых нитей по уровню — 2 мм;
- ширина рельсовой колеи в середине переводной кривой — 1532 мм, боковой износ рельсов — 1 мм, отклонение рельсовых нитей по уровню — 2 мм;
- ширина рельсовой колеи в переднем стыке крестовины — 1518 мм, боковой износ рельсов — 1 мм, отклонение рельсовых нитей по уровню — 7 мм;
- ширина рельсовой колеи в месте схода (крестовина) — 1523 мм, боковой износ рельсов — 1 мм, отклонение рельсовых нитей по уровню — 6 мм.

В целом можно сказать, что все параметры стрелочного перевода находятся в пределах нормы.

Для определения сил, возникающих в контакте «колесо — рельс» при прохождении стрелочного перевода, производилось компьютерное моделирование с применением программного комплекса «Универсальный механизм». Аналогичные расчеты проводились в работе [4]. Определялись вертикальные и боковые силы, а также коэффициент запаса устойчивости от вкатывания колеса на рельс.

Основная формула для определения максимальной динамической нагрузки ($P_{\text{max дин}}$) от колеса на рельс имеет вид:

$$P_{\text{max дин}} = P_{\text{cp}} + \lambda S, \quad (2)$$

где $P_{\text{max дин}}$ — максимальная динамическая вертикальная нагрузка от колеса на рельс;

P_{cp} — среднее значение вертикальной нагрузки колеса на рельс;

λ — нормирующий множитель, определяющий вероятность появления максимальной нагрузки. Согласно многолетнему опыту расчетов, значение λ принимается равным 2,5, что соответствует вероятности превышения расчетной нагрузки 0,006 (6 случаев на 1000 проходов колеса);

S — среднее квадратическое отклонение динамической вертикальной нагрузки колеса на рельс.

Мгновенное значение коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельса $K_{\text{уст}}$ определяют по формуле (3) [10]:

$$K_{\text{уст}} = \frac{\text{tg}\beta - \mu}{1 + \mu \cdot \text{tg}\beta} \cdot \frac{P_{\text{в}}}{P_{\text{б}}}, \quad (3)$$

где β — угол наклона образующей гребня колеса к горизонтали, для колес без износа по ГОСТу [16] принимают $\beta = 60^\circ$;

μ — коэффициент трения между гребнем колеса и рельсом;

$P_{\text{в}}$ — вертикальная сила (H), действующая от колеса на рельс в диапазоне частот от 0 до 20 Гц (положительное направление вниз);

$P_{\text{б}}$ — боковая сила (H), действующая от колеса на рельс в диапазоне частот от 0 до 20 Гц.

Коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельса оценивают для случая действия боковой силы в направлении вползания гребня колеса на головку рельса. Минимальное значение коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельса определяют с вероятностью 0,0015 в соответствии с [10].

В расчете приняты следующие исходные данные:

– максимальная осевая нагрузка — 6,35 тс/ось;

- фактическая скорость движения — 25 км/ч;
- рельсы Р65, шпалы железобетонные, правосторонний стрелочный перевод противощерстного направления марки 1/9 на спуске с уклоном 3,3 %, балласт — щебень из естественного камня;
- план и профиль пути моделировался на основании предоставленных данных для участков по фактическим параметрам (данные взяты из паспорта дистанции пути).

На рис. 4 представлена модель плана и продольного профиля пути.

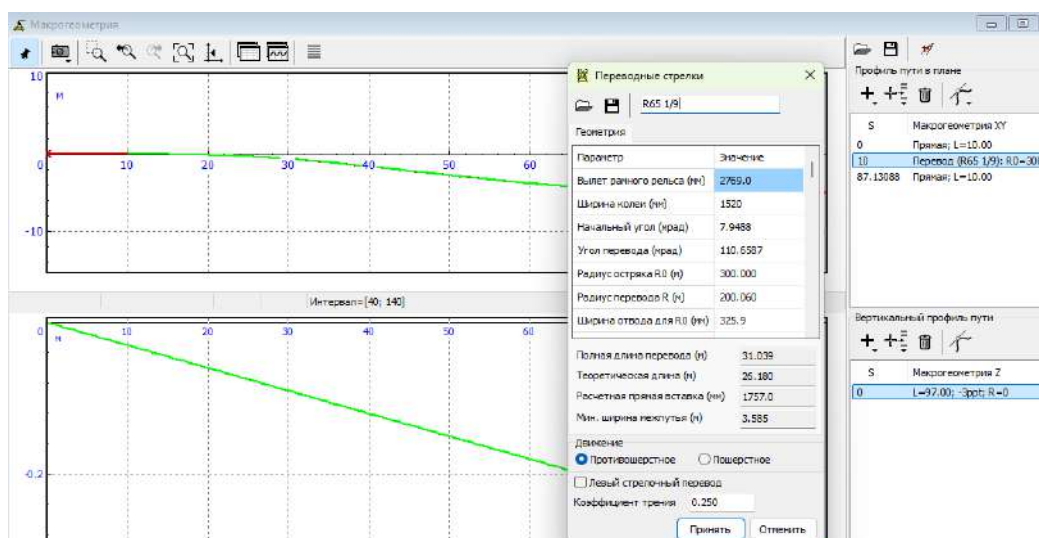


Рис. 4. Модельные план и профиль пути на участке схода

С целью оценки влияния неровностей геометрии рельсовой колеи на характер движения подвижного состава моделирование проводилось для следующих случаев:

- модель пути без неровностей рельсовой колеи;
- модель пути с неровностями рельсовой колеи (учитывались величины неровностей на момент схода платформ).

Результаты расчета изменения оцениваемых параметров во времени представлены в виде графиков на рисунках 5–7.

При проведении статистической обработки результатов расчета выявлены следующие особенности:

1. При набегании колеса на остряк возникает резкое в доли секунды возрастание боковых и вертикальных сил. Максимальная боковая сила в зоне остряка на стрелочном переводе составила без неровностей геометрии рельсовой колеи 18,37 кН. Возникновение такой силы происходит на 13,78 с при проходе левого колеса, согласно рис. 5. В то же время фактические неровности пути, имевшиеся на стрелочном переводе в момент схода платформ, приводят к небольшому увеличению боковой силы до 18,51 кН. Возникновение такой силы происходит также на 13,78 с при проходе левого колеса, согласно рис. 5.

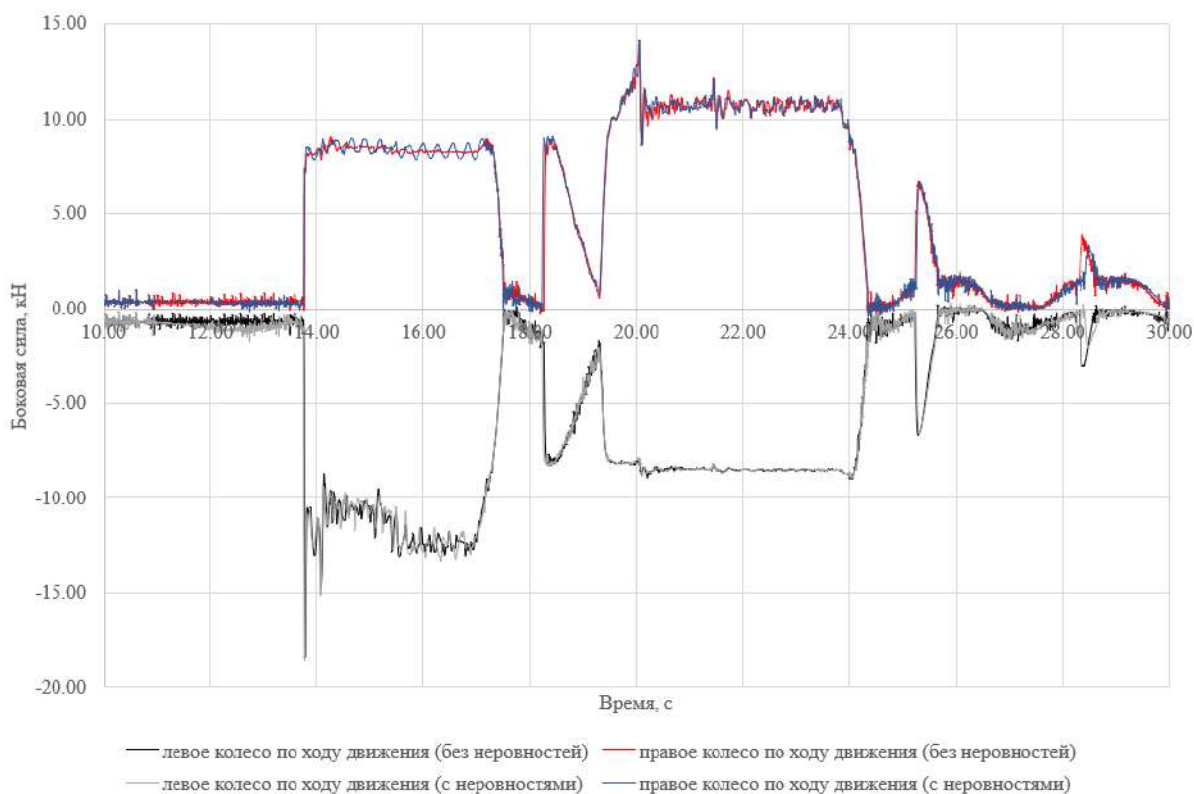


Рис. 5. Значения боковых сил при скорости движения 25 км/ч

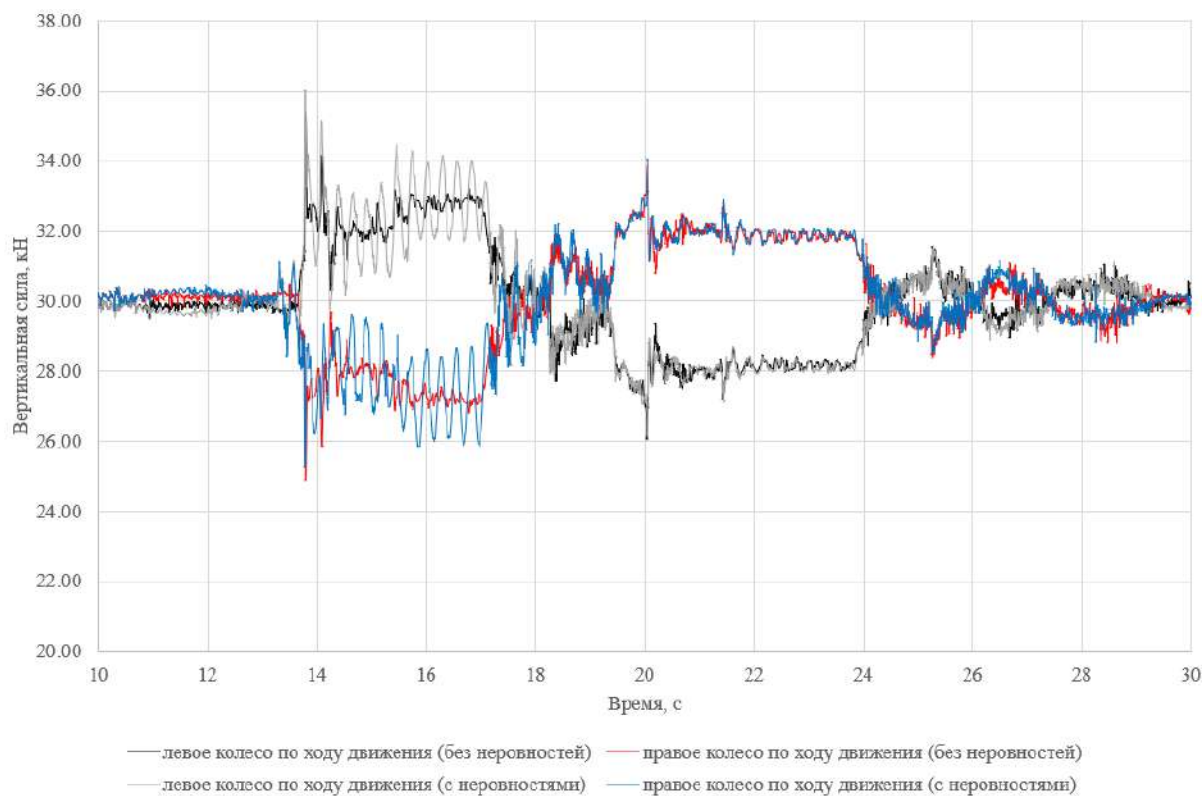


Рис. 6. Значения вертикальных сил при скорости движения 25 км/ч

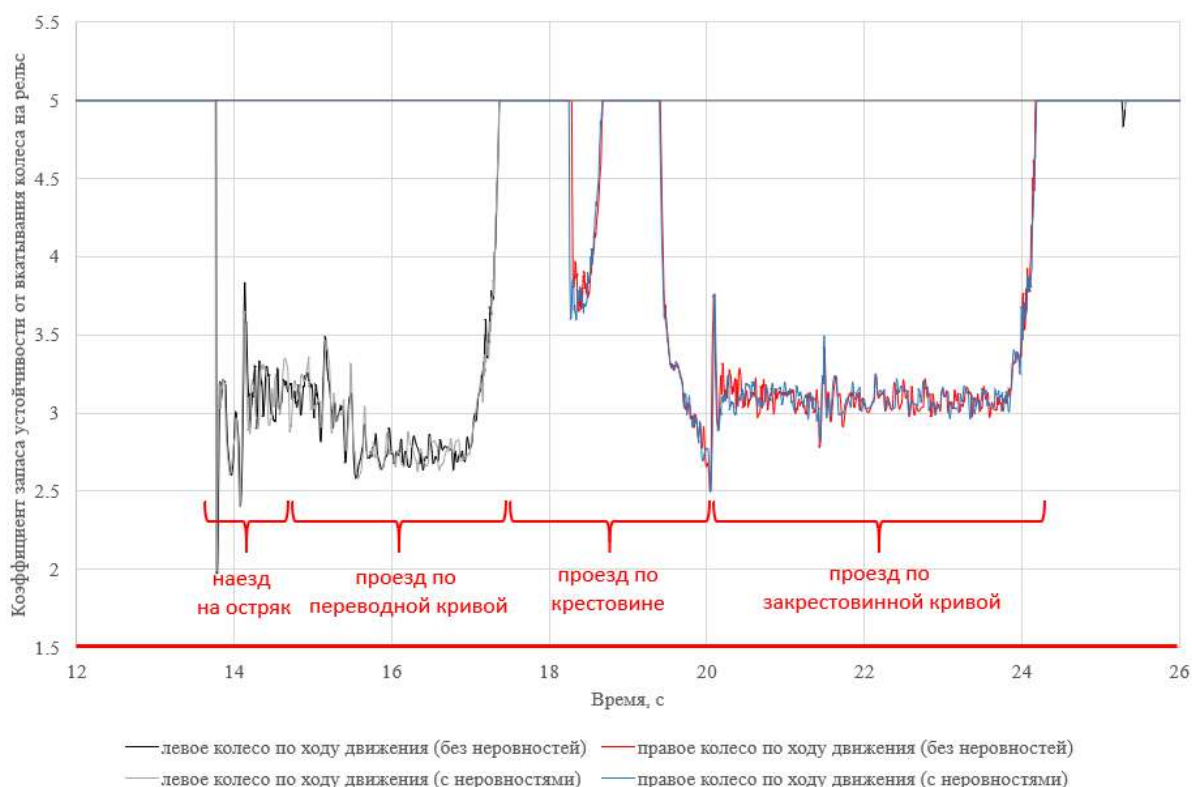


Рис. 7. Коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельса при скорости движения 25 км/ч

2. Наибольшие значения вертикальных сил получены по левой рельсовой нити по ходу движения при набегании колеса на остяк. Величины этих сил при отсутствии неровностей составили 35,37 кН, с учетом неровностей — 36,03 кН. Возникновение таких сил происходит на 13,79 с при проходе левого колеса, согласно рис. 6. Можно сказать, что неровности геометрии рельсовой колеи, имевшие место на момент схода, оказывают небольшое влияние на изменение вертикальных сил. Хотя на графиках отчетливо видно амплитуду колебаний подвижного состава при проходе пути с неровностями.

3. Вертикальные силы по правой рельсовой нити по ходу движения составили 24,88 кН на пути без неровностей, с учетом неровностей — 25,27 кН. Возникновение таких сил происходит также на 13,79 с при проходе правого колеса, согласно рис. 6. Наблюдаются перегруз одной рельсовой нити и обезгруживание другой. Это характерная особенность движения подвижного состава по стрелке.

4. При перекатывании колес по крестовине также неизбежно возникает резкое изменение вертикальных и боковых сил. Это происходит на 20,05 с. Причины этого описаны выше.

5. Минимальное значение коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельса получено также в момент прохождения платформ по стрелке. Величина коэффициента при отсутствии неровностей составила 1,99, с учетом неров-

ностей — 1,98. Такой коэффициент получаем на 13,78 с, согласно рис. 7. Это говорит о достаточно устойчивом положении колес в момент прохода платформ стрелочного перевода.

6. В данном расчете не учитывались неровности ходовых частей подвижного состава.

7. В то же время дополнительные воздействия, вызванные неровностями путевой структуры на стрелочном переводе, могли оказать влияние на обезгруживание и смещение наружу колес набегавшего колеса тележки платформы.

На основании проведенных исследований для конкретного случая была сформирована предполагаемая картина схода и схема причинно-следственных связей (рис. 8):

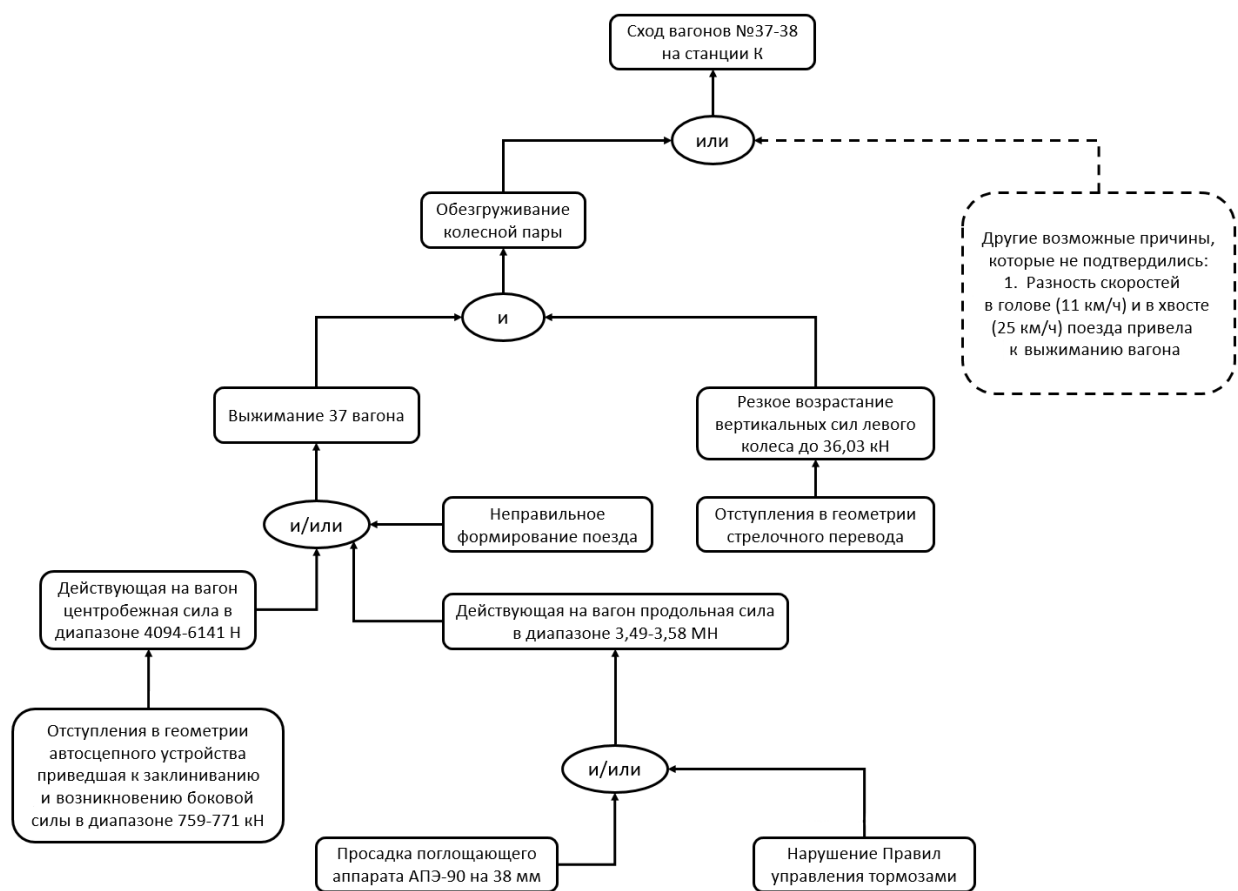


Рис. 8. Схема причинно-следственных связей

При движении поезда по стрелочному переводу № 39 на вагон № 37 действовала продольная сила сжатия в диапазоне 3,49–3,58 МН. Такую величину сил создают разность скоростей в голове и хвосте состава ($V_{\text{голова}} = 11$ км/ч и $V_{\text{хвост}} = 25$ км/ч) и при торможении набегание хвостовых загруженных вагонов на пассажирские платформы. Происходит обезгруживание колес второй по ходу движения тележки 37-го вагона. Дополнительно в переводной кривой стрелочного перевода

возникает центробежная сила в интервале от 4094 до 6141 Н (изменение радиуса кривизны стрелочного перевода 1/9 от 200 до 300 м), которая могла привести к обезгруживанию и смещению наружу колеи набегающего колеса второй по ходу движения тележки 37-го вагона.

Также во время движения на вагоне № 37 одна автосцепка была заклинена, у другой была просадка. Такое сочетание могло привести к неустойчивому положению тележек под вагоном (типа «елочка»), что является сопутствующим фактором [17]. Когда при торможении состав сжался, то, возможно, произошло обезгруживание колесной пары второй по ходу движения тележки, что привело к выжиманию вагона № 37.

Заключение

Результаты исследования показывают, что даже незначительные отклонения в техническом состоянии узлов подвижного состава (износ автосцепки, пятника-подпятника, рессорного комплекта), которые по отдельности могут находиться в пределах норм, в совокупности с неисправностями геометрии рельсовой колеи способны привести к серьезным последствиям. Необходимо разработать уточненную методику оценки рисков, учитывающую сочетанное влияние этих факторов и вводящую контроль за «внутренней кинематикой» вагона как за единым показателем устойчивости.

Проведенные исследования показывают, что сход подвижного состава является результатом наложения сразу нескольких факторов: неправильных действий машиниста, конструктивных особенностей пути и технического состояния вагонов. Рекомендуется при расследованиях подобного рода происшествий использовать математическое моделирование не только постфактум, но и для построения прогнозных моделей, чтобы выявлять опасные сочетания параметров еще до возникновения критической ситуации.

Моделирование показало, что даже при нахождении параметров стрелочного перевода в пределах норм, его конструктивные особенности (переводная кривая, крестовина) генерируют динамические нагрузки, способные «обезгрузить» колесо. Рекомендуется для мест пересечения неблагоприятного профиля (спуски) со стрелочными переводами марок 1/9 разрабатывать дополнительные предупреждения или корректировать скоростной режим с учетом возможных продольных усилий в составе.

Список источников

1. Сокол Э. Н. Сходы с рельсов и столкновения подвижного состава (Судебная экспертиза. Элементы теории и практики). Киев: Транспорт Украины, 2004. 368 с.
2. Оленцевич В. А., Гозбенко В. Е. Анализ причин нарушения безопасности работы железнодорожной транспортной системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 1 (37). С. 180–183.

3. Крылач А. И., Буяннэмэх А., Оленцевич В. А. Вопросы повышения уровня безопасности движения поездов на Восточном полигоне // Молодая наука Сибири. 2024. № 1 (23). С. 22–30.
4. Ермоленко И. Ю., Морозов Д. В., Асташков Н. П. Влияние продольных нагрузок на безопасность движения при эксплуатации на горно-перевальных участках пути // Вестник РГУПС. 2021. № 2. С. 104–111. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_2_104.
5. Бакланов А. А., Клюка В. П., Мосол С. А. Анализ причин схода подвижного состава с рельсов // Известия Транссиба. 2024. № 2 (58). С. 46–60.
6. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава: протокол заседания Совета по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества от 6–7 мая 2014 года № 60.
7. Тюньков В. В., Рычков Н. П., Бузунова В. С. Синтез конструктивных решений на основе демпфирования в пределах внутренней кинематики грузовых вагонов // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2021. № 3 (11). С. 9–16. DOI: 10.26731/2658-3704.2021.3(11).9-16.
8. Сидорова Е. А., Певзнер В. О., Чечельницкий А. И. Показатели силового взаимодействия пути и подвижного состава при движении грузового вагона по длинным неровностям с учетом действия продольных сил // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80, № 6. С. 359–365. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-6-359-365>.
9. Сахаров П. А. Расчетно-экспериментальный метод исследования продольной динамики поезда // Механика. Исследования и инновации. 2020. Вып. 13. С. 128–140.
10. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (с Поправкой, с Изменением № 1): национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 05.06.2015 № 565-ст. М.: Стандартинформ, 2020. 54 с.
11. Фришман М. А. Как устроен путь под поездами. М.: Транспорт, 1975. 175 с.
12. Карпущенко Н. И., Комардинкин Р. А. Обеспечение безопасности при проезде поездов по стрелочным переводам на особогрузонапряженных участках // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (62). С. 31–39. DOI 10.52170/1815-9265_2022_62_31.
13. Повороженко В. В., Богданов Ю. В., Пигусов В. Н. Путь и путевое хозяйство. М.: Транспорт, 1986.
14. Гаврюшин М. А., Спиоров А. В., Лунин А. А. Исследование причин сходов подвижного состава методами компьютерного моделирования // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ: тезисы докладов VI Научно-технического семинара. Брянск, 2024. С. 105–109.
15. Результаты динамических и по воздействию на путь испытаний поездов повышенной массы и длины / В. С. Коссов [и др.] // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2018. № 2 (42). С. 82–87.

16. ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатанные. Технические условия (с Изменением № 1): национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23.06.2011 № 142-ст. М.: Стандартиформ, 2011. 40 с.

17. Морозов Д. В., Ермоленко И. Ю., Пыхалов А. А. Влияние сил упругого псевдо-проскальзывания колесных пар на возникновение ударных импульсов в поезде // Динамика и виброакустика. 2025. Т. 11, № 1. С. 40–50. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-1-40-50.

Дата поступления: 02.02.2026

Решение о публикации: 03.03.2026

Контактная информация:

ЕРМОЛЕНКО Игорь Юрьевич — канд. техн. наук; ermolenko_iy@list.ru

КОВЕНЬКИН Дмитрий Александрович — канд. техн. наук, доцент; kowenkin@yandex.ru

Specific features of the railcar kinematics causing rolling stock derailment when traversing turnouts

I. Yu. Ermolenko, D. A. Kovenkin

Irkutsk State Transport University, 15 Chernyshevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia

For citation: *Ermolenko I. Yu., Kovenkin D. A. Specific features of the railcar kinematics causing rolling stock derailment when traversing turnouts // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 81–98. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-81-98. (In Russian)*

Abstract

This study focuses on issues of improving train safety on challenging railway track sections, including mountain pass lines and station tracks, with a particular emphasis on the railcar-track system. **Objective:** to identify non-obvious causes and relationships leading to rolling stock derailment when passing through turnouts. **Methods:** this research adhered to the established methodological framework for investigating derailment incidents as sanctioned by the regulatory protocols of JSC “Russian Railways”. In addition, the Universal Mechanism software package was used to simulate and evaluate the dynamic behaviour of the railcar. **Results:** the findings indicate that localized degradation in specific rolling stock components, such as the automatic coupler, can induce significant lateral forces. These forces are sufficient to cause wheelset unloading, thereby an increased risk of derailment. The study analyzed the interaction between the wheelset and the track under standardized parameters, resulting in the generation of graphical dependencies illustrating the lateral and vertical forces arising at the wheel-track contact. **Practical significance:** the results of the study make it possible to reconsider the issue of rolling stock-track interaction by incorporating updated concepts regarding the internal and external kinematics of railcars. The investigation concludes that even minor deviations in the technical integrity of individual parts can have a profound effect on operational safety. Thus, the necessity for developing a more precise methodology for safety assessment based on these technical nuances.

Keywords: safety of train operation, track switch, freight car, automatic coupling, rolling stock derailment, railcar kinematics

References

1. Sokol E.N. Skhody s rel'sov i stolknoveniya podvizhnogo sostava (Sudebnaya ekspertiza. Elementy teorii i praktiki). Kiev: Transport Ukrainy, 2004. 368 s. (In Russian)
2. Olentsevich V.A., Gozbenko V.E. Analiz prichin narusheniya bezopasnosti raboty zheleznodorozhnoj transportnoj sistemy // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2013. No. 1 (37). S. 180–183. (In Russian)
3. Krylach A.I., Buyannemekh A., Olentsevich V.A. Voprosy povysheniya urovnya bezopasnosti dvizheniya poezdov na Vostochnom poligone // *Molodaya nauka Sibiri*. 2024. No. 1 (23). S. 22–30. (In Russian)
4. Ermolenko I. Yu., Morozov D.V., Astashkov N.P. Vliyanie prodol'nykh nagruzok na bezopasnost' dvizheniya pri ekspluatatsii na gorno-pereval'nykh uchastkakh puti // *Vestnik RGUPS*. 2021. No. 2. S. 104–111. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_2_104. (In Russian)
5. Baklanov A.A., Klyuka V.P., Mosol S.A. Analiz prichin skhoda podvizhnogo sostava s rel'sov // *Izvestiya Transsiba*. 2024. No. 2 (58). S. 46–60. (In Russian)
6. Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: protokol zasedaniya Soveta po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv — uchastnikov Sodruzhestva ot 6–7 maya 2014 goda. No. 60. (In Russian)
7. Tyun'kov V. V., Rychkov N.P., Buzunova V.S. Sintez konstruktivnykh reshenij na osnove dempfirovaniya v predelakh vnutrennej kinematiki gruzovykh vagonov // *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami*. 2021. No. 3 (11). S. 9–16. DOI: 10.26731/2658-3704.2021.3(11).9-16. (In Russian)
8. Sidorova E.A., Pevzner V.O., Chechel'nitskij A.I. Pokazateli silovogo vzaimodejstviya puti i podvizhnogo sostava pri dvizhenii gruzovogo vagona po dlinnym nerovnostyam s uchetom dejstviya prodol'nykh sil // *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT)*. 2021. T. 80, no. 6. S. 359–365. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-6-359-365>. (In Russian)
9. Sakharov P.A. Raschetno-eksperimental'nyj metod issledovaniya prodol'noj dinamiki poezda // *Mekhanika. Issledovaniya i innovatsii*. 2020. Vyp. 13. S. 128–140. (In Russian)
10. GOST 33211-2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam (s Popravkoj, s Izmeneniem No. 1): natsional'nyj standart Rossijskoj Federatsii: utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 05.06.2015 No. 565-st. M.: Standartinform, 2020. 54 s. (In Russian)
11. Frishman M.A. Kak ustroen put' pod poezdami. M.: Transport, 1975. 175 s. (In Russian)
12. Karpushchenko N.I., Komardinkin R.A. Obespechenie bezopasnosti pri proезде poezdov po strelochnym perevodam na osobogruzonapryazhennykh uchastkakh // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2022. No. 3 (62). S. 31–39. DOI 10.52170/1815-9265_2022_62_31. (In Russian)
13. Povorozhenko V.V., Bogdanov Yu. V., Pigusov V.N. Put' i putevoe khozyajstvo. M.: Transport, 1986. (In Russian)

14. Gavryushin M.A., Spirov A.V., Lunin A.A. Issledovanie prichin skhodov podvizhnogo sostava metodami komp'yuternogo modelirovaniya // Komp'yuternoe modelirovanie v zhelezno-dorozhnom transporte: dinamika, prochnost', iznos: tezisy dokladov VI Nauchno-tehnicheskogo seminaru. Bryansk, 2024. S. 105–109. (In Russian)

15. Rezul'taty dinamicheskikh i po vozdeystviyu na put' ispytaniy poezdov povyshennoj massy i dliny / V.S. Kossov [i dr.] // Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolij: Tekhnika zheleznykh dorog. 2018. No. 2 (42). S. 82–87. (In Russian)

16. GOST 10791-2011. Kolesa tsel'nokatanye. Tekhnicheskie usloviya (s Izmeneniem No. 1): natsional'nyj standart Rossijskoj Federatsii: utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 23.06.2011 No. 142-st. M.: Standartinform, 2011. 40 s. (In Russian)

17. Morozov D.V., Ermolenko I. Yu., Pykhalov A.A. Vliyanie sil uprugogo psevdoproskal'zvaniya kolesnykh par na vzniknovenie udarnykh impul'sov v poezde // Dinamika i vibroakustika. 2025. T. 11, no. 1. S. 40–50. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-1-40-50. (In Russian)

Received: 02.02.2026

Accepted: 03.03.2026

Author's information:

Igor Yu. ERMOLENKO — PhD in Engineering; ermolenko_iy@list.ru

Dmitry A. KOVENKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; kowenkin@yandex.ru

УДК 681.11.031.1

Анализ технических характеристик тяговых аккумуляторных батарей городского наземного электрического транспорта

А. Н. Сычугов, В. Д. Быльцева, А. В. Курков

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Сычугов А. Н., Быльцева В. Д., Курков А. В. Анализ технических характеристик тяговых аккумуляторных батарей городского наземного электрического транспорта // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 99–111. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-99-111

Аннотация

Цель: исследование технических характеристик накопителей электрической энергии, используемых на городском наземном электрическом транспорте Санкт-Петербурга, направленное на выявление инновационных решений для повышения производительности и стабильности функционирования транспортных систем города. **Методы:** использован комплексный подход, включающий проведение сравнительного анализа ключевых показателей трех типов тяговых аккумуляторных батарей, которые эксплуатируются на городском наземном электрическом транспорте: никель-марганец-кобальтовые (NMC), литий-железо-фосфатные (LiFePO₄) и литий-титанатные (LTO). Оценивались основные характеристики, такие как продолжительность эксплуатации накопителей, объем запасенной энергии, количество возможных циклов заряда-разряда, скорость восполнения и расходования электроэнергии, устойчивость к пожарам и экономические факторы. Особое внимание было уделено перспективам внедрения троллейбусов с увеличенным автономным ходом (ТУАХ) на улицах города Санкт-Петербурга. **Результаты:** доказано превосходство литий-железо-фосфатных тяговых аккумуляторных батарей над остальными видами накопителей, обусловленное их длительным сроком службы, стабильностью рабочих характеристик и оптимальным балансом цены и качества. Были определены приоритетные направления дальнейшей разработки накопителей электрической энергии, включающие рост удельной энергоемкости, минимизацию теплоотвода при заряде, повышение пожаростойкости материалов, соблюдение принципов экологически безопасной переработки отходов и уменьшение расходов на эксплуатацию накопителей. **Практическое значение:** выводы данного исследования служат основой для принятия обоснованных решений относительно выбора конкретного типа тяговой аккумуляторной батареи для последующего оснащения ими городского наземного электрического транспорта города Санкт-Петербурга. Накопители электрической энергии также содействуют формированию стратегии модернизации существующей транспортной инфраструктуры города, способствуя снижению энергопотребления, улучшению экологической обстановки и устойчивого развития города.

Ключевые слова: городской наземный электрический транспорт, троллейбусы, трамвайные вагоны, накопители электрической энергии, городская инфраструктура

В Российской Федерации в последнее время реализуется комплексная программа развития и модернизации городского наземного электрического транспорта. В ходе анализа аналитического отчета «Троллейбусный транспорт в России. Состояние и перспективы рынка» видно, что на улицах городов идет преобладание электробусов и газовых автобусов по сравнению с троллейбусами.

Связано это с неактуальными экономическими расчетами и транспортными критериями, а также с решением о частичном или даже полном сокращении троллейбусного сообщения в ряде городов России.

В табл. 1 показаны сравнение видов транспорта, расчеты разных видов транспортных средств (далее — ТС), где был взят за основу стандартный маршрут подвижного состава протяженностью 10 км только в одну сторону. Хочется отметить, что троллейбус с увеличенным автономным ходом (далее — ТУАХ) движется на протяжении заданного маршрута и под контактной сетью (далее — КС) и с помощью накопителя электроэнергии. Для преодоления того же маршрута электробусом путь должен быть оснащен зарядными станциями.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение видов транспорта

№ п/п	Статьи затрат	Ед. изм.	Автобус (ДТ)	Автобус (КПГ)	Троллейбус без УАХ	Троллейбус с УАХ	Электробус
1	Техническое обслуживание и ремонт	тыс. руб.	15 540,00	17 879,20	16 275,00	16 800,00	27 195,00
2	Топливо/электроэнергия на движение	тыс. руб.	21 782,30	12 119,10	10 710,00	10 710,00	10 710,00
3	Цена инфраструктуры и ее обслуживания	тыс. руб.	0,00	0,00	4 567,50	2 283,80	0,00
4	Цена замены АКБ	тыс. руб.	0,00	0,00	0,00	5 500,00	0,00
5	Цена ТС с учетом обновления (с субсидией для автобусов с комбинированным газом)	тыс. руб.	28 071,40	37 757,10	16 500,00	21 000,00	36 800,00
Итого на ед.		тыс. руб.	65 393,70	67 755,40	48 052,50	56 293,80	74 705,00
Итого в расчете на 1 км пробега		руб/км	62,30	64,50	45,80	53,60	71,10

Из данной таблицы видно, что эксплуатация обычного троллейбуса и ТУАХ обходится дешевле, чем эксплуатация других транспортных средств.

Город Санкт-Петербург может по праву считаться лидером троллейбусного движения, так как в эксплуатации находится более 850 троллейбусов, а протяженность маршрутной сети составляет около 700 км. Одним из перспективных направлений развития троллейбусного сообщения является реализация СПб ГУП «Горэлектротранс» программы по расширению маршрутной сети троллейбуса с использованием троллейбуса с увеличенным автономным ходом. Преимущества накопителей электрической энергии представлены в виде таблицы на рис. 1.



Рис. 1. Преимущества накопителей электрической энергии

Эти преимущества делают системы накопления электрической энергии важным элементом устойчивого развития городского наземного электрического транспорта города и области. Они способствуют повышению эффективности работы электрического транспорта, улучшению качества жизни горожан за счет уменьшения загрязнения воздуха и снижения уровня шума [1–2].

ТУАХ — это подвижной состав, получающий электроэнергию от внешнего источника питания через контактную сеть с помощью токоприемника. Данный тип транспортного средства оснащается тяговыми аккумуляторными батареями (далее — ТАБ). Зарядка накопителей осуществляется во время движения ТС под КС. В табл. 2 представлены модели троллейбусов, эксплуатирующиеся в СПб ГУП «Горэлектротранс».

В ходе анализа табл. 2 видно, что обычные троллейбусы составляют бóльшую часть троллейбусных парков СПб ГУП «Горэлектротранс» — 508 ед., в отличие от ТУАХ (326 ед.). Преимущества ТУАХ по сравнению с другим видом транспорта представлены на рис. 2.

ТАБЛИЦА 2. Модели троллейбусов в СПб ГУП «Горэлектротранс»

№ п/п	Модель	Привод	Мощность ТЭД, кВт	Конструкционная скорость, км/ч	Габариты (длина, высота, ширина), мм	Вместимость, чел.	Наличие автономного хода (да/нет)	Тип ТАБ	Длительность автономного хода, км	Всего ПС в парке ГЭТ, ед.
1	АКСМ-32100D («Ольгерд») АХ	ДК-211БМ	170	60	12 500 2550 3680	80	да	Никель-марганец- кобальтовая батарея (NMC)	20	97
		Škoda	180							
		АНТ-155	185							
		ДТА-1У1	180							
		АТЧД-250	150							
2	АКСМ-321	8МЛ/3550	180	70	12 307 3666 2500	155	нет	–	–	96
			150							
3	АКСМ-32100D	ДК-215Б	150	60	12 307 3666 2500	115	да	Литий-железо- фосфатная батарея (LiFePO4)	25	35
			115							
4	6281.00 «Адмирал»	КРА-200М4Н	115	80	12 375 3470 2500	96	нет	–	–	87
		КРА-280-2М4У2	180							
		АТ250L4У2	120							
		АТ250LВ4У2	180							
		ДТА-3У1	170							
5	5298-0000010-01 «Авангард»	ДТА-У1У	180	70	12 300 3370 2530	107	нет	–	–	166
			180							
6	5298-0000010-01 «Авангард АХ»	ДТА-У1У	180	70	12 300 3370 2530	107	да	Никель-марганец- кобальтовая батарея (NMC)	10 и 25	10 км — 35 25 км — 50 Всего: 85
			180							
7	6215-0000010-01 «Премьер»	ДК-211БМ	170	70	18 575 3370 2530	185	нет	–	–	23
			180							

Окончание ТАБЛИЦЫ 2

№ п/п	Модель	Привод	Мощность ТЭД, кВт	Конструкционная скорость, км/ч	Габариты (длина, высота, ширина), мм	Вместимость, чел.	Наличие автономного хода (да/нет)	Тип ТАБ	Длительность автономного хода, км	Всего ПС в парке ГЭТ, ед.
8	43303 (БКМ)	Škoda	210	60	18750 2862 2500	162	нет	–	–	20
9	ТРОЛЗА-5265.08	ТАД280L4У2	180	60	11665 3470 2550	80	да	Литий-железо-фосфатная батарея (LiFePO4)	20	79
10	ТРОЛЗА-5265.02	ДТА-1У1	180	60	12335 3470 2550	100	да	Литий-титанатная батарея (LTO)	15	10
11	Тролза-5265 «Мегаполис»	ТАД280L4	180	60	12660 3470 2550	100	нет	–	–	113
12	СИНАРА-6254	ДТА-3У1	170	70	12582 3650 2550	90	да	Никель-марганец-кобальтовая батарея (NMC)	25	20
13	ВМЗ-5298-01	ДК-211БМ	170	70	12950 3370 2470	114	нет	–	–	3
		ТАД-280	180							

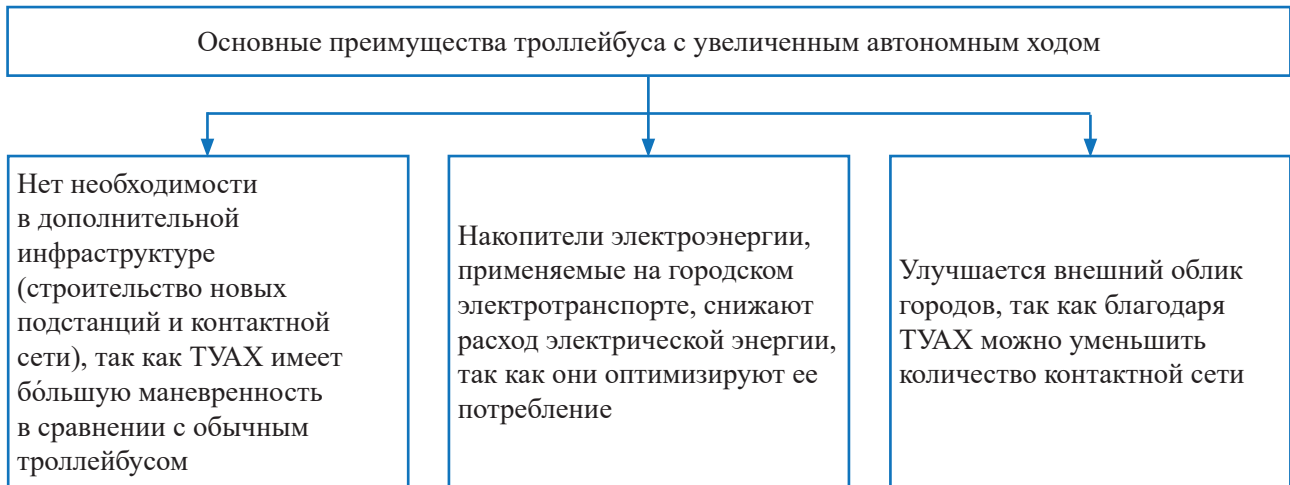


Рис. 2. Преимущества троллейбуса с увеличенным автономным ходом

Использование системы автономного хода представляет собой передовое решение, которое имеет ряд достоинств и способствует развитию современной городской инфраструктуры городов.

СПб ГУП «Горэлектротранс» использует для системы автономного хода тяговые аккумуляторные батареи, чаще всего типа никель-марганец-кобальтовые (NMC) и литий-железо-фосфатные (LiFePO₄). На рис. 3 показана диаграмма тяговых аккумуляторных батарей, которые используются на подвижном составе СПб ГУП «Горэлектротранс».

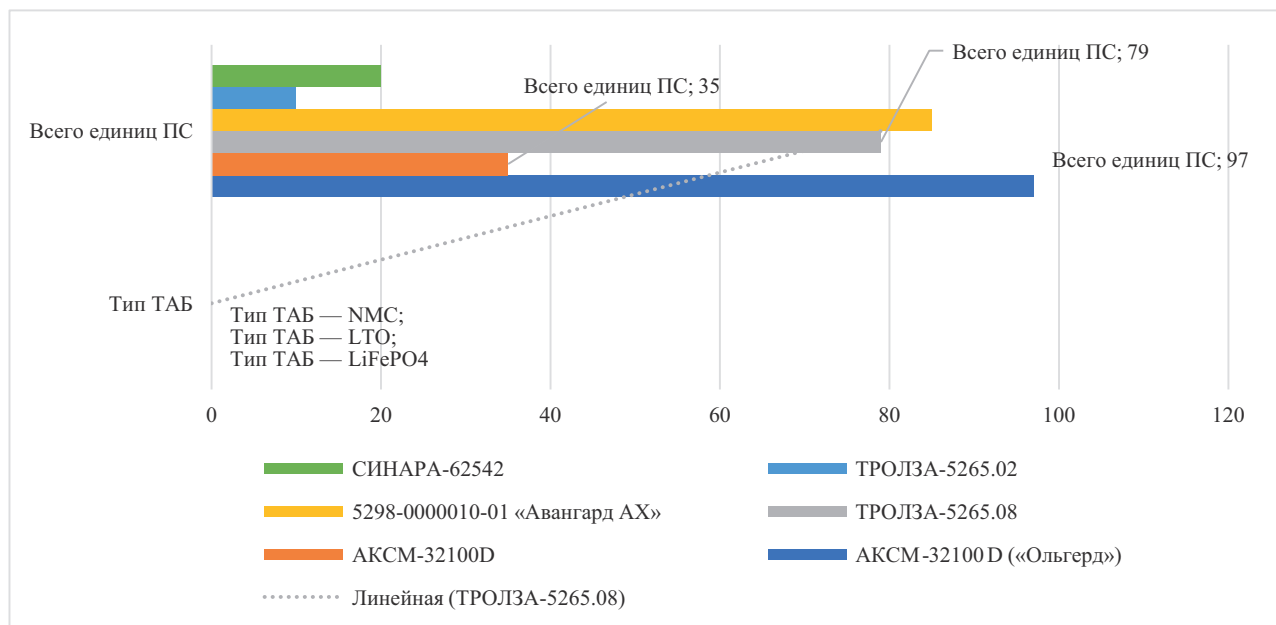


Рис. 3. Тяговые аккумуляторные батареи, которые используются на подвижном составе СПб ГУП «Горэлектротранс»

Характеристики тяговых аккумуляторных батарей представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Характеристики тяговых аккумуляторных батарей

Тип накопителя	Никель-марганец-кобальтовая ТАБ	Литий-железо-фосфатная ТАБ	Литий-титанатная ТАБ
Производитель	EnerZ	ООО «Лиотех-Инновации»	«Драйв-Электро»
Емкость, А·ч	64	170	80
Масса комплекта, кг	640	1250	680
Максимальный ток, А	Зарядка — 320, Разрядка — 448	Зарядка — 170, Разрядка — 400	Зарядка — 120, Разрядка — 240
Номинальное напряжение, В	650	460	440
Тип охлаждения/ подогрева	Система кондиционирования воздухом из салона	Система кондиционирования воздухом из атмосферы	С помощью рабочей жидкости
Пробег в режиме автономного хода при номинальной нагрузке, км	7,5–10	Не менее 7,5	
Время зарядки, мин	50		
Срок службы, лет	8		
Масса ТАБ, кг	320	650	342
Удельная энергия, Вт·ч/кг	150–220	180–200	1400
Преимущества	— высокое напряжение на выходе ТАБ; — широкий диапазон рабочей температуры без дополнительных систем	— низкая цена; — высокая емкость	— короткая продолжительность цикла зарядки; — надежная и эффективная система терморегулирования
Недостатки	низкая устойчивость к перепадам температуры	— в составе имеется система охлаждения ТАБ, требующая дополнительных затрат; — пластиковый корпус ячеек ТАБ ухудшает теплоотвод	высокая цена

При выборе накопителей электрической энергии, применяемых на городском наземном электрическом транспорте, необходимо учитывать их основные технические характеристики, чтобы обеспечить бесперебойную работу и долговечность системы питания города [3–4].

Часто используемым типом накопителей на городском транспорте являются литий-железо-фосфатные (LiFePO₄) тяговые аккумуляторные батареи, так как по сравнению с аналогами они более безопасны (менее склонны к перегреву), имеют высокую долговечность (высокий цикл прочности) и обладают стабильным напряжением на протяжении всего цикла разрядки [5–6].

Они имеют маленькую энергетическую плотность, что делает их массогабаритными, но в то же время дорогостоящими. Литий-железо-фосфатные тяговые аккумуляторные батареи применяются на ТУАХ модели ТРОЛЗА-5265.08, показанном на рис. 4.



Рис. 4. Троллейбус модели ТРОЛЗА-5265.08 (Фото О. В. Соловьёва)

Преимуществом NMC-батареи является высокая энергетическая плотность, то есть способность запасать большое количество энергии по сравнению с аналогами, и быстрая скорость зарядки. Также данный тип ТАБ способен на протяжении долгого времени сохранять свою емкость и производительность.

На рис. 5–6 показаны троллейбусы модели АКСМ-32100D и 5298-0000010-01 «Авангард» с использованием никель-марганец-кобальтовых батарей.



Рис. 5. Троллейбус модели АКСМ-32100D (фото О. В. Соловьёва)



Рис. 6. Троллейбус модели 5298-0000010-01 «Авангард» (фото О. В. Соловьева)

Еще одним типом ТАБ являются ЛТО-батареи, которые популярны благодаря быстрой скорости заряда и разряда, большому диапазону рабочих температур и долговечности. Из недостатков можно отметить их низкую энергетическую плотность, плохие массогабаритные показатели и высокую стоимость изготовления комплектующих батарей [7–10].

На рис. 7 показан троллейбус модели ТРОЛЗА-5265.02 «Мегаполис» с использованием литий-титанатных батарей.



Рис. 7. Троллейбус модели ТРОЛЗА-5265.02 «Мегаполис»
(фото СПб ГУП «Горэлектротранс»)

Выводы

Наиболее распространенным типом аккумуляторов, используемым на троллейбусах с увеличенным автономным ходом, является LiFePO_4 , который отличается высокой безопасностью, долговечностью, хорошим соотношением цены и качества, широким диапазоном рабочих температур и экологичностью.

Из перечисленных тяговых аккумуляторных батарей самые большие проблемы в эксплуатации отличают литий-титанатную батарею, так как она имеет низкую энергетическую плотность, теряет эффективность при глубоких разрядах и сложна в интеграции с существующей инфраструктурой. Эти недостатки делают эксплуатацию ЛТО-аккумуляторов менее привлекательной по сравнению с аналогами. Ключевые проблемы, связанные с тяговыми аккумуляторными батареями, которые нужно решить, представлены на рис. 8.

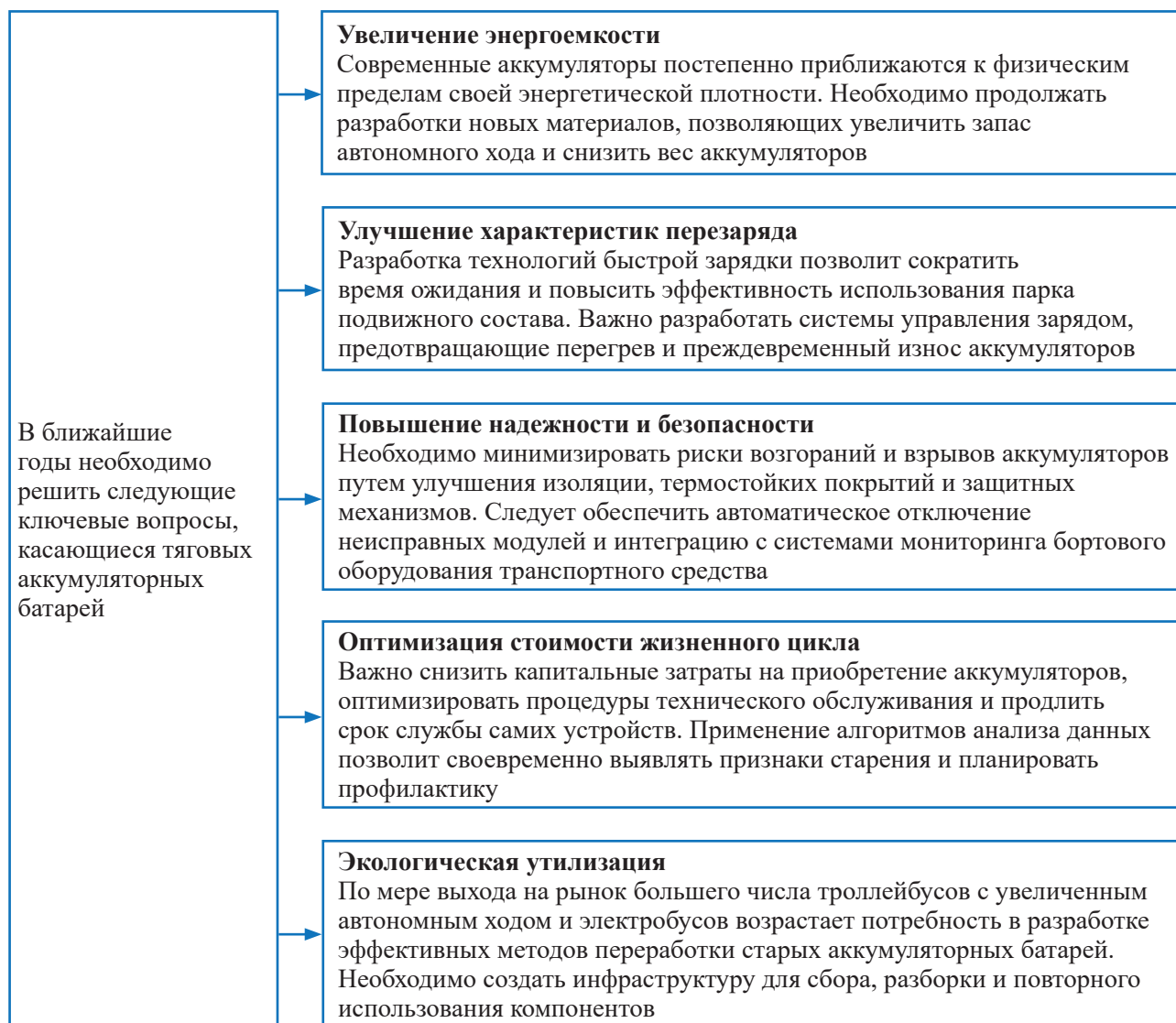


Рис. 8. Ключевые проблемы тяговых аккумуляторных батарей

Решив указанные задачи, общественный транспорт станет более экологически чистым, безопасным и доступным, способствуя устойчивому развитию транспортной отрасли страны.

Современный подвижной состав оснащен высокоэффективными и мощными электродвигателями, позволяющими реализовать интенсивный разгон и плавное

электрическое торможение практически до нулевой скорости. Однако высокая мощность требует большой электрооснащенности тяговой сети, что создает повышенную нагрузку на существующие контактные системы электроснабжения и тяговые подстанции, построенные несколько десятилетий назад.

Таким образом, внедрение современного подвижного состава предъявляет серьезные требования к состоянию инфраструктуры города, необходимость своевременной модернизации которой становится приоритетной задачей городского хозяйства.

Список источников

1. Козлов С. В., Киндряшов А. Н., Соломин Е. В. Анализ эффективности систем накопления энергии. Южно-Уральский государственный университет // Основные проблемы энергетики и альтернативной энергии. 2015. С. 29–34.
2. Эволюция конструкции подвижного состава легкорельсового транспорта в Санкт-Петербурге / А. А. Воробьев [и др.] // Известия ПГУПС. 2020. Т. 17, № 1. С. 62–70.
3. Викулов И. П., Быльцева В. Д. Целесообразность применения рельсового транспорта в инфраструктуре городов // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сб. трудов. Т. 1. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. 84–86 с.
4. Быльцева В. Д., Изварин М. Ю., Ким К. К. Системы автономного хода городского электрического транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 300–319. DOI: 10.17816/transsyst634812
5. Евстафьев А. М. Применение гибридных технологий в тяговом подвижном составе // Бюллетень результатов научных исследований. 2018. Вып. 3. С. 27–38.
6. Евстафьев А. М. Оценка энергоемкости бортового накопителя энергии для тягового подвижного состава // Бюллетень результатов научных исследований. 2018. Вып. 2. С. 7–17.
7. Быльцева В. Д., Изварин М. Ю., Ким К. К. Системы автономного хода городского электрического транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10, № 3. С. 300–319. DOI: 10.17816/transsyst634812.
8. Евстафьев А. М. Повышение энергетической эффективности электрического подвижного состава: дисс. ... д-ра техн. наук. СПб., 2018. EDN ZCZMUV.
9. Евстафьев А. М. Применение гибридных технологий в тяговом подвижном составе // Бюллетень результатов научных исследований. 2018. Вып. 2. С. 27–38.
10. Парфенов С. И. Троллейбус с автономным ходом // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 3–4. С. 40–41. EDN PBZH9R.

Дата поступления: 05.02.2026

Решение о публикации: 04.03.2026

Контактная информация:

СЫЧУГОВ Антон Николаевич — канд. техн. наук; sychugov@pgups.ru

БЫЛЬЦЕВА Василиса Дмитриевна — аспирант; vasilisa7887@bk.ru

КУРКОВ Александр Валентинович — канд. техн. наук; a.v.kurkov-spb@yandex.ru

Analysis of traction battery performance in urban electric transport

A. N. Sychugov, V. D. Byltseva, A. V. Kurkov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Sychugov A. N., Byltseva V. D., Kurkov A. V.* Analysis of traction battery performance in urban electric transport // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 99–111. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-99-111. (In Russian)

Abstract

Objective: to investigate the performance of battery energy storage systems deployed in St. Petersburg's urban ground electric transport, aimed at identifying innovative measures to improve system performance and operational reliability of the city transport systems. **Methods:** a comprehensive comparative analysis was undertaken, focusing on the key performance parameters of three traction battery types employed in urban electric transport: nickel-manganese-cobalt (NMC), lithium-iron-phosphate (LiFePO₄), and lithium-titanate (LTO). Key parameters were assessed, including service life of the storage systems, energy storage capacity, cycle life (number of charge-discharge cycles), charge and discharge rates, fire safety attributes, and economic factors. Special emphasis was placed on the prospects for deploying trolleybuses with an extended off-wire (autonomous) range (ERTs) on the streets of St. Petersburg. **Results:** the findings have demonstrated the superiority of lithium-iron-phosphate (LiFePO₄) traction batteries relative to other types of batteries due to their prolonged service life, stable operational characteristics, and an advantageous balance of cost and performance. Priority areas for further development of electrical energy storage devices have been identified, including increased specific energy density, reduced heat generation during charging, improved thermal and fire resistance of materials, ensuring environmentally responsible recycling of end-of-life units, and lowering lifecycle operating costs of the storage systems. **Practical significance:** the findings of this study provide a basis for informed decision-making regarding the selection of a particular traction-battery type for equipping urban electric transport in St. Petersburg. Energy storage systems likewise support the formulation of a modernization strategy for the city's existing transport infrastructure, facilitating reduced energy consumption, improved environmental quality, and advancement toward sustainable development.

Keywords: urban electric transport, trolleybuses, street tram cars, electric energy storage systems, urban infrastructure

References

1. Kozlov S.V., Kindryashov A.N., Solomin E.V. Analiz effektivnosti sistem nakopleniya energii. Yuzhno-Ural'skij gosudarstvennyj universitet // Osnovnye problemy energetiki i al'ternativnoj energii. 2015. S. 29–34. (In Russian)
2. Evolyutsiya konstruksii podvizhnogo sostava legkorel'sovogo transporta v Sankt-Peterburge / A. A. Vorob'ev [i dr.] // Izvestiya PGUPS. 2020. T. 17, no. 1. S. 62–70. (In Russian)
3. Vikulov I.P., Byl'tseva V.D. Tselesoobraznost' primeneniya rel'sovogo transporta v infrastrukture gorodov // III Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: sb. trudov. T. 1. SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2021. 84–86 s. (In Russian)
4. Byl'tseva V.D., Izvarin M.Yu., Kim K.K. Sistemy avtonomnogo khoda gorodskogo elektricheskogo transporta // Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii. 2024. T. 10. № 3. S. 300–319. DOI: 10.17816/transsyst634812. (In Russian)

5. Evstaf'ev A.M. Primenenie gibridnykh tekhnologij v tyagovom podvizhnom sostave // Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij. 2018. Vyp. 3. S. 27–38. (In Russian)
6. Evstaf'ev A.M. Otsenka energoemkosti bortovogo nakopitelya energii dlya tyagovogo podvizhnogo sostava // Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij. 2018. Vyp. 2. S. 7–17. (In Russian)
7. Byl'tseva V. D., Izvarin M. Yu., Kim K.K. Sistemy avtonomnogo khoda gorodskogo elektricheskogo transporta // Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii. 2024. T. 10, no. 3. S. 300–319. DOI: 10.17816/transsyst634812. (In Russian)
8. Evstaf'ev A.M. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti elektricheskogo podvizhnogo sostava: diss. ... d-ra tekhn. nauk. SPb., 2018. EDN ZCZMUV. (In Russian)
9. Evstaf'ev A.M. Primenenie gibridnykh tekhnologij v tyagovom podvizhnom sostave // Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij. 2018. Vyp. 2. S. 27–38. (In Russian)
10. Parfenov S.I. Trolleybus s avtonomnym khodom // Transport Rossijskoj Federatsii. 2012. No. 3–4. S. 40–41. EDN PBZHHR. (In Russian)

Received: 05.02.2026

Accepted: 04.03.2026

Author's information:

Anton N. SYCHUGOV — PhD in Engineering, Associate Professor; sychugov@pgups.ru

Vasilisa D. BYLTSEVA — Postgraduate Student; vasilisa7887@bk.ru

Aleksandr V. KURKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; a.v.kurkov-spb@yandex.ru

УДК 621.873.2/3

Численные исследования напряженно-деформированного состояния элементов стреловых самоходных кранов на железнодорожном ходу в трехмерной нестационарной постановке задачи

И. Н. Мунзаров¹, А. А. Воробьев², А. С. Ватаев², Я. С. Ватулин¹, В. С. Майоров²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Для цитирования: Мунзаров И. Н., Воробьев А. А., Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Майоров В. С. Численные исследования напряженно-деформированного состояния элементов стреловых самоходных кранов на железнодорожном ходу в трехмерной нестационарной постановке задачи // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 112–127. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-112-127

Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Аннотация

Цель: разработана численная модель стрелового самоходного крана на железнодорожном ходу для определения напряженно-деформированного состояния основных несущих элементов металлоконструкции в трехмерной нестационарной постановке задачи. **Методы:** компьютерный эксперимент. **Результаты:** изучена динамика формирования режимов нагружения кранового оборудования при раскачивании гибкого подвеса груза в процессе трансформации ядра опорного контура в результате неравномерной просадки опор в грунт. **Практическая значимость:** разработана математическая модель железнодорожного стрелового самоходного крана, позволяющая выполнять численные исследования напряженно-деформированного состояния в трехмерной нестационарной постановке.

Ключевые слова: стреловые самоходные краны на железнодорожном ходу, динамический режим нагружения, просадка выносной опоры, динамика формирования режимов нагружения, трехмерная нестационарная постановка задачи, потеря устойчивости грунта откосного участка железнодорожного пути

Введение

Успешное решение задачи скорейшего восстановления движения при возникновении чрезвычайных ситуаций (ЧС) на ж/д инфраструктуре напрямую связано с эффективностью организации и проведения аварийно-восстановительных работ (АВР), основную часть которых составляют погрузочно-разгрузочные и монтажные операции. Ключевой особенностью выполнения данных операций является большое количество факторов, существенно влияющих на безопасность проводимых работ, не поддающихся, однако, однозначному определению в условиях недостатка времени [1, 2]. Наибольшую сложность представляют определение

параметров перемещаемого груза (масса, габариты, радиусы подъема), получение информации о состоянии грунта, наличии подземных коммуникаций и иных ограничивающих факторов.

Практика выполнения АВР показала, что основными способами обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожных стреловых самоходных кранов (ЖССК) в данных условиях являются разработка и использование гибких проектов производства работ. Это, в свою очередь, предусматривает резервные сценарии производства работ при изменении условий в зависимости от результатов оперативной разведки на месте, осуществление поэтапного уточнения параметров груза (например, взвешивание на этапе строповки) и иных значимых факторов обеспечения безопасности и эффективности проводимых мероприятий.

Немаловажным фактором является обучение персонала работе в условиях неопределенности: проведение инструктажей и тренировок по ускоренному анализу ситуации и принятию решений в аварийных условиях с применением процедуры риск-анализа, основная задача которого сводится к выявлению потенциально опасных событий, количественной оценке вероятности их возникновения и прогнозированию их последствий.

Применение процедур риск-анализа требует, в свою очередь, формирования сценариев развития событий, сводящихся в отношении ЖССК к проработке возможных сочетаний схем нагружения. Здесь существенную помощь эксперту, осуществляющему рассмотрение спектра вероятных сценариев развития событий, могут оказать результаты численных экспериментов, выполненных на основе имитационных моделей, которые описывают реальные свойства (поведение) объекта при различных комбинациях нагружений, соответствующих штатным, пограничным и аварийным ситуациям. Значимость сценариев определяется частотой их возникновения, тяжестью последствий и синергетическим эффектом действующих факторов.

Имитационные модели или цифровые двойники, в основе которых лежит структурно-функциональная математическая модель, воспроизводят основные свойства исследуемого объекта в опорных точках состояний, определяемых совокупностью граничных условий, и позволяют выявлять зоны концентрации напряжений, оценивать запас прочности при суперпозиции нагрузок, прогнозировать отказы на основе критериев разрушения без проведения физического эксперимента. Это, в свою очередь, позволяет избегать проведения натуральных экспериментов, в ходе которых возможно достижение критических режимов функционирования конструкции ЖССК, приводящих к резкому снижению остаточного ресурса по критерию несущей способности.

Задача создания имитационных моделей ЖССК не является новой. В разное время вопросам создания цифровых двойников и методам их исследования было посвящено достаточное количество работ [1–4, 6], однако особенностью

эксплуатации ЖССК в условиях производства АВР является, как правило, недостаточное качественное состояние опорной площадки, а также высокая вероятность неопределенности параметров груза (веса, положения центра масс), связанная с изменением свойств деформированных частей перемещаемого аварийного подвижного состава. Это, в свою очередь, требует детального изучения работы крана в условиях просадок грунта и существенного изменения нагрузки на стрелу. В работах [3, 5, 7, 8] были выполнены подобные исследования, однако они либо касались штатных режимов, либо моделирование стрелы было выполнено с помощью представления ее в виде жестких секций, соединенных фиктивными шарнирами, что не позволило адекватно отразить реальную физическую картину протекающих процессов. Также следует отметить, что во многих работах не учитывается и то, что опоры ЖССК устанавливаются на балластной призме вблизи склонов, что может вызвать оползание склона и нарушить устойчивость крана. Все перечисленные обстоятельства делают актуальной цель настоящей работы — разработку имитационной модели, позволяющей получать напряженно-деформированное состояние конструкции ЖССК с учетом упруго-пластических свойств грунта и динамических процессов, происходящих при перемещении груза.

Методы исследования

Основным методом, применяемым в настоящей работе, является численное моделирование на основе метода конечных элементов (МКЭ), которое обладает существенным преимуществом по отношению как к аналитическим, так и к альтернативным численным методам [4], заключающимся в определении пространственных перемещений конструкции с учетом пластических деформаций сопряженных элементов в условиях неравномерного контакта [9, 10, 4], характерного для агрегатов ЖССК. В процессе имитационного моделирования реализуются сценарии развития неисправности с целью выявления характерных диагностических признаков предварительной фазы процесса, в частности изменения тренда контролируемых параметров объекта вследствие изменения его структуры.

В качестве объекта исследования выбран стреловой самоходный кран на железнодорожном ходу (ЖССК) «Сокол-80.01М» [11] (рис. 1 а).

Модель телескопической стрелы (ТС) крана представляет собой консольную сплошностенчатую конструкцию коробчатого сечения переменной жесткости (рис. 1 б), образованную из сопрягаемых неподвижной (корневой) (1) и подвижных секций (2, 3), из которых каждая последующая смонтирована внутри предыдущей. Подвижные секции опираются на опорные элементы (ползуны) (4), из которых одни установлены в верхней задней части внутренней секции, другие — в нижней передней части внешней секции. От бокового смещения секции удерживаются подобными боковыми упорами (5). Перемещение секций осуществляется

длинноходовыми гидроцилиндрами (ГЦ) двустороннего действия (6, 7), шарнирно связанными с телескопируемыми секциями неподвижными (3), и скользящими (2) опорами. Изменение углового положения стрелового оборудования осуществляется посредством спаренных гидроцилиндров (8). Поворотная и крановая рамы выполнены сварными сплошностенчатыми конструкциями коробчатого сечения, сопряженными опорно-поворотным устройством в виде подшипника (3). Портал поворотного устройства имеет узлы шарнирного соединения с корневой секцией стрелы (1) и гидроцилиндрами изменения вылета стрелы (2). Крановая рама имеет четыре гидрофицированные выносные опоры флюгерного типа (4).

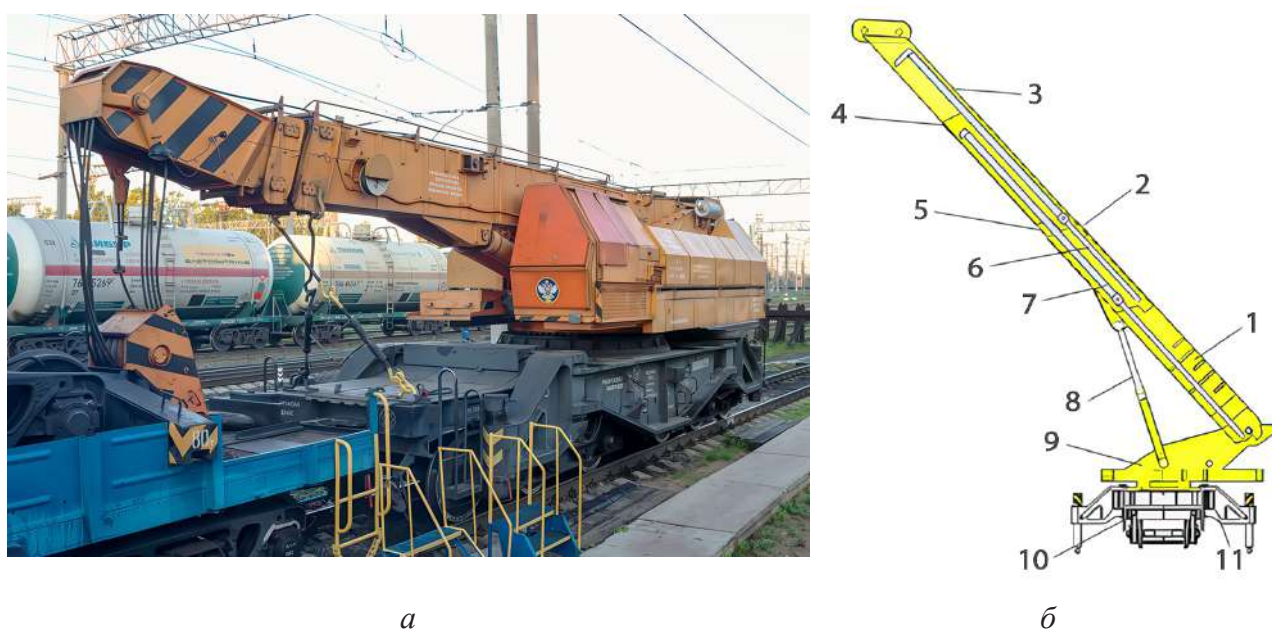


Рис. 1. Стреловой самоходный кран на железнодорожном ходу «Сокол-80.01М»: *а* — общий вид (фото А. В. Яшкова); *б* — имитационная модель (силовая установка, капот и кабина управления не показаны)

Особенностью конструкции данного крана является то, что в корпусе средней секции стрелы находятся два консольно-закрепленных гидроцилиндра, обладающих высокой гибкостью при длине 9 м и диаметре 0,185 м [12] (рис. 2). Свободные колебания консолей этих элементов создают значительный дополнительный изгибающий момент в сопряженном штоке ГЦ, а также разнонаправленные реакции в шарнирах крепления цапфы цилиндра к секции стрелы, что вызывает местную деформацию сечений стенок секций, подверженных осевым нагрузкам. При этом контактные усилия (рис. 2 *а*) в сопряжении «поршень — гильза» функционально зависят от величины выхода штока и угла перекоса ступеней в процессе свободных колебаний консольно-закрепленных гильз.

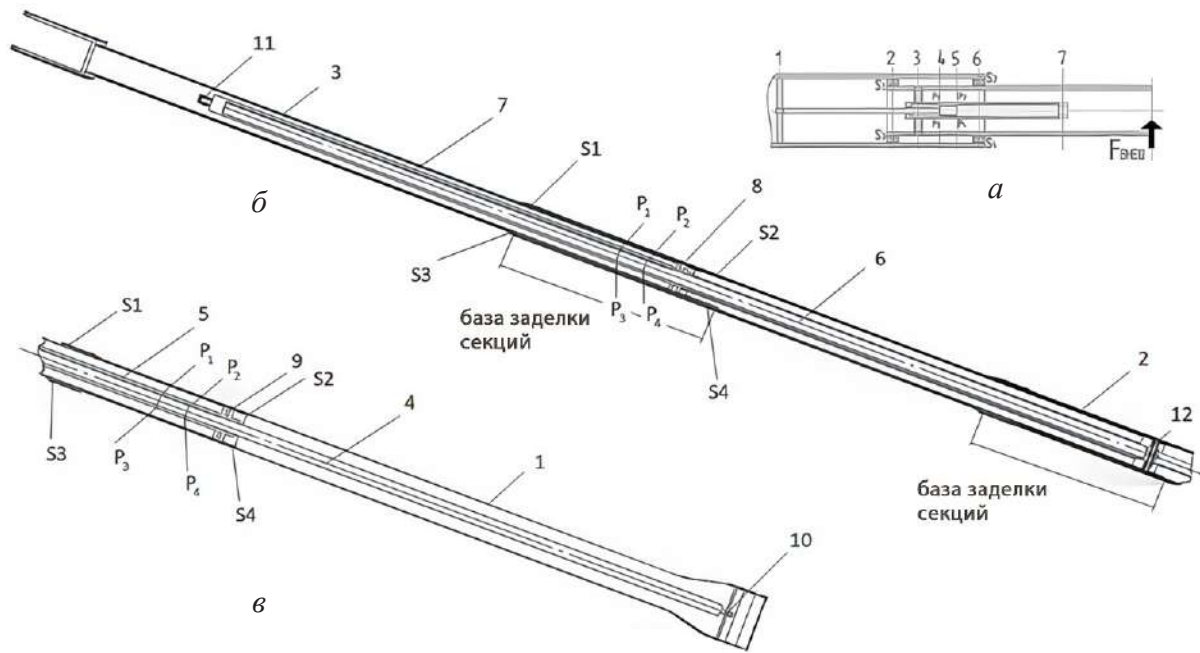


Рис. 2. Принципиальное и конструктивное устройство стрелового оборудования ЖССК:

- 1 — секция корневая; 2 — шарнир телескопического сопряжения;
 3 — секция концевая; 4 — шток ГЦ промежуточной секции; 5 — гильза ГЦ промежуточной секции; 6 — шток ГЦ концевой секции; 7 — гильза ГЦ концевой секции; 8 — цапфа гильзы ГЦ промежуточной секции; 9 — цапфа ГЦ концевой секции; 10 — шарнир крепления штока ГЦ промежуточной секции; 11 — подвижная опора ГЦ концевой секции;
 12 — шарнир гидроцилиндра телескопирования

Как известно, стрела крана — это система с распределенными параметрами, в которой динамические нагрузки возникают в результате взаимодействия сил инерции и сил упругости элементов [3, 4, 13]. Инерционные нагрузки обусловлены динамическими процессами, которые вызваны воздействием вертикальных инерционных сил, возникающих при ускоренном или замедленном подъеме/опускании груза, просадке опор крана, кратковременном инерционном импульсе, приводящем к забросу секций стрелы при обрыве троса или резком снижении массы груза, а также горизонтальных сил, связанных с изменением скорости вращения поворотной платформы. Эти явления могут вызвать раскачивание груза, что, в свою очередь, становится причиной появления дополнительных вертикальных и горизонтальных сил.

С целью повышения адекватности разрабатываемой имитационной модели здесь учитывается особенность силового взаимодействия секций стрелы с элементами ГЦ, а именно многоопорная схема контактирования с переменной

податливостью с двусторонней и односторонней связью. Так, в зависимости от направления действия инерционной силы и расположения плоскости вращения шарнира (12), цапфы (8) (рис. 2 *a*) элемент системы «ТС — ГТС» оказывается либо заземленным в сечении (3), то есть является консолью, либо не обеспечивает противодействия в данном направлении — является шарнирно-опертым элементом, опорой с односторонней связью.

Для учета изменения во времени граничных условий при выполнении исследований на каждом временном шаге задаются внешние силы (векторные нагрузки, распределенные давления), кинематические ограничения (перемещения опор, скорости выдвижения секций), контактные условия (затягивание/ослабление соединений) и на этой основе методом шагового интегрирования вычисляются напряжения и деформации с проверкой превышения предела текучести материала и корректировкой величин пластических деформаций и жесткости элементов [14]. Для задания пластических деформаций во времени используются модели пластичности Прандтля — Рейса, а также критерии текучести Треска и Мизеса.

При моделировании напряженно-деформированных состояний ЖССК используются следующие допущения и упрощения:

1. Материал элементов является однородным и изотропным и имеет следующие характеристики [15]: модуль Юнга $2 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона 0,31, предел текучести 340 МПа, модуль пластичности 1,5 ГПа.

2. Все отверстия и валы в начальный момент времени являются цилиндрическими.

3. Деформации подчиняются закону Гука. Пластические деформации отсутствуют.

4. Свойства грунта моделируются с помощью модели Мора — Кулона по методике, изложенной в [3].

5. Шпальная выкладка представляет собой однородный материал. Силы внутреннего трения между ее составными частями, а также взаимные перемещения шпал при нагружении не учитываются.

6. Каждая секция моделируется как упругое тело.

7. Узлы соединения представляют с помощью шарниров с заданными степенями свободы, контактных элементов, а также упруго-демпферных связей для имитации податливости креплений.

8. Перед началом исследования предполагаем, что зазоры между контактирующими элементами отсутствуют. Проскальзывание в направляющих не учитывается.

В задачах исследования режимов динамического нагружения телескопических стрел одним из важнейших аспектов является корректное представление внешнего воздействия на конструкцию. В существующих моделях [16, 17]

канатный подвес чаще всего заменяется сочетанием силовых факторов, приложенных к оголовку стрелы, либо представляется одноканатным маятниковым подвесом с точечным креплением на оголовке стрелы.

Практика эксплуатации и исследования кранов показывает, что нагружение оголовка ЖССК осуществляется следующим образом: в начале процесса нормальная составляющая весовой нагрузки подвеса передается на ручей направляющего блока оголовка стрелы. Составляющая весовой нагрузки из плоскости подвеса воздействует на реборду блока, вызывая кручение секции, а затем выбираются зазоры в телескопическом сочленении секций 1, 2, 3 (рис. 1 б). Далее возникает изгибная деформация концевой секции под действием инерционной силы. Наконец, колебания передаются на гильзу гидроцилиндра телескопирования через цапфовое соединение (8, 9) (рис. 2 б). По завершении процесса выборки зазоров в сочленениях горизонтальная инерционная нагрузка передается через боковые, диагонально расположенные направляющие упоры непосредственно на стенки узла телескопического сочленения последующей секции. При этом активация каждого узла происходит только после накопления достаточной энергии в системе. Фазы колебаний секций стрелы и гильзы ГЦ могут совпадать, при этом контактные напряжения возрастают или могут оказываться в противофазе, в этом случае контакт подвижной опоры с секцией стрелы может временно отсутствовать.

Наиболее корректный вариант моделирования процесса нагружения стрелы предложен в работе [18], где подвес представлен пространственной упруго-податливой конструкцией с жесткостными характеристиками, полученными в соответствии с руководством по эксплуатации крана [11]. Однако в этой модели не учитывается возможное ослабление одного или нескольких подъемных канатов при раскачивании подвеса.

Известно, что при раскачивании груза возникает боковая составляющая N , вызывающая инерционное смещение подвеса груза из плоскости качания стрелы. Она воспринимается ребордой ручья блока (рис. 3 в) и представляется в виде осевой нагрузки K . При этом ось блоков оказывается загруженной неравномерно, реакции в опорах оси становятся неодинаковыми, что приводит к появлению дополнительного момента скручивания оголовка концевой секции. В предлагаемой модели наличие рассмотренного выше скручивающего момента учитывается путем представления системы тросов и полиспаста в виде кольцевых упругих элементов (3), имитирующих упруго-жесткостные свойства грузового каната и передающих весовую нагрузку (1) на оголовки концевой секции стрелы (4) через систему подвижных и неподвижных блоков (2) (рис. 3 б).

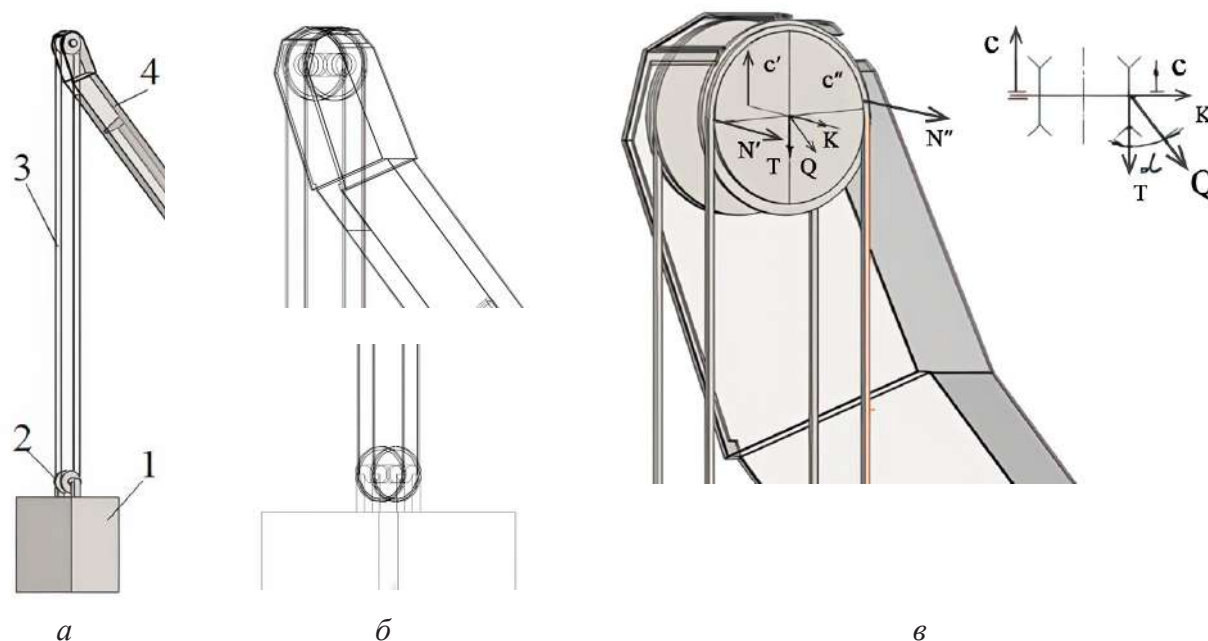


Рис. 3. Методика моделирования конструктивного устройства полиспаста: *а* — общий вид контактирующих элементов; *б* — представление канатов в виде кольцевых упругих элементов; *в* — распределение инерционных сил при раскачивании груза

Моделирование условия вывешивания ЖССК на земляном сооружении насыпи железнодорожного пути

К особенностям производства погрузочно-разгрузочных работ с помощью ЖССК следует отнести особые условия вывешивания ЖССК на земляном сооружении насыпи железнодорожного пути. Габариты поверхности основной площадки земляного полотна недостаточны для устройства опорного контура грузоподъемной машины [19], поэтому с целью увеличения опорной площади на нулевом месте земляного полотна производится устройство шпальной выкладки 3–5 слоев (рис. 4) [19]: выполняется ступенчатое срубание откоса до получения ровной площадки, выкладывается шпальная решетка необходимой высоты. Для предотвращения смещения слоев клетки и ее депланации производятся сбивание решетки скобами и отсыпка щебнем, согласно требованиям [19], предписывающим получение плотности присыпки не ниже 95 % максимальной плотности, полученной при стандартном уплотнении, в глубину — не ниже 90 %.

Практика эксплуатации ЖССК показывает наличие неравномерного внедрения шпальных выкладок в грунт (под углом к поверхности), что вызывает скольжение опорного башмака аутригера вдоль контактной поверхности со шпальной выкладкой [3, 4, 20]. Вследствие данного явления центр сферической опоры штока смещается относительно геометрической оси гидроцилиндра (ГЦ) аутригера, возникает эксцентриситет приложения осевой нагрузки, что приводит к появлению

поперечных усилий в конструкции ГЦ. Напряжения в корпусных элементах перераспределяются: зоны, рассчитанные на осевую нагрузку, испытывают изгибные и сдвиговые деформации [8, 19, 21, 22].

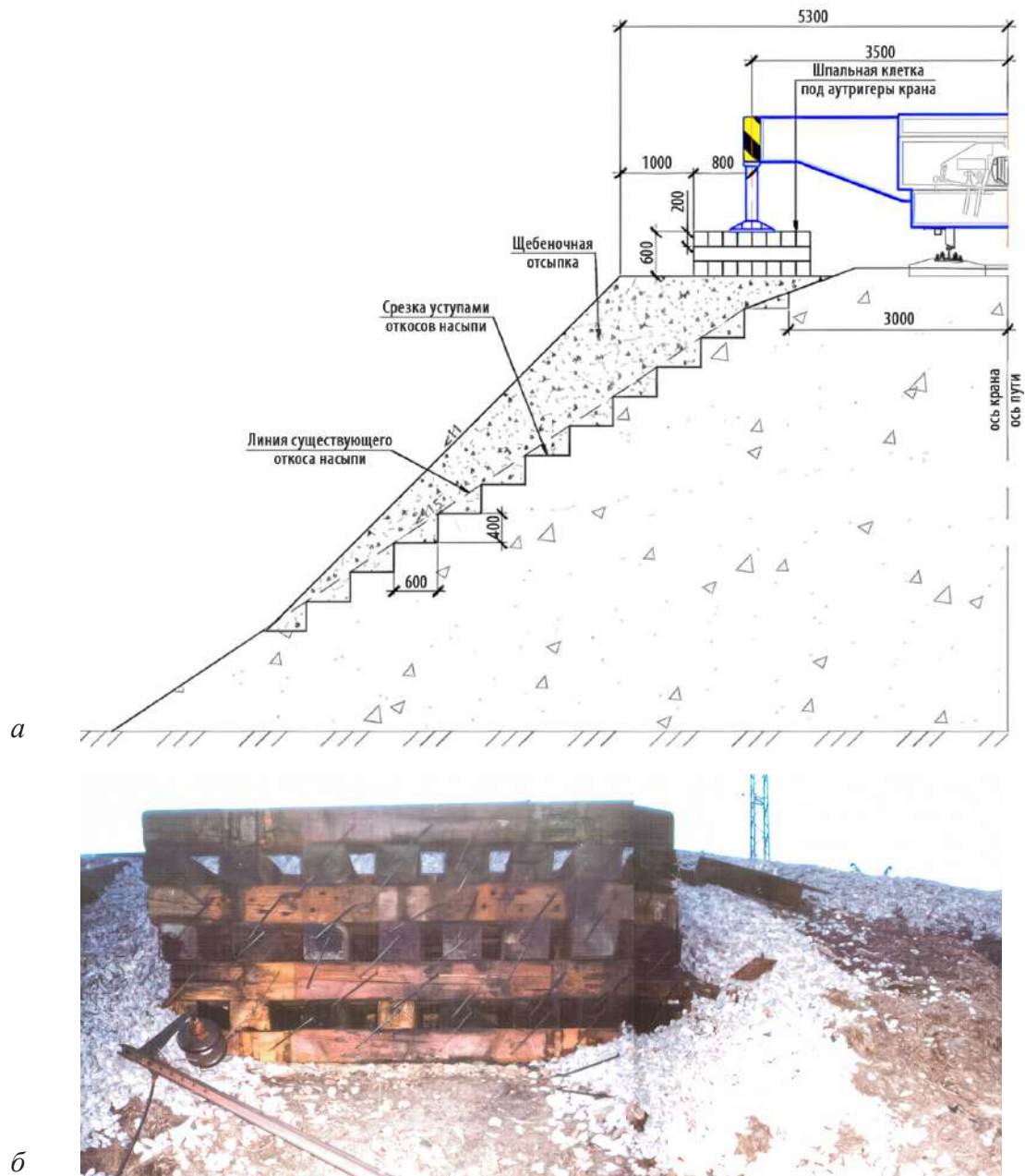


Рис. 4. Шпальная выкладка с производством срубания откоса земляного полотна:
а — устройство принципиальное; *б* — практическая реализация (фото Д. Е. Попова)

Наиболее совершенная реологическая модель шпальной клетки и грунта представлена в работе [3, 6] пространственной схемой вертикально и наклонно расположенных моделей Кельвина — Фойгта, состоящих из упругой пружины и вязкого элемента (демпфера) [21], а также специальных моделей Кельвина — Фойгта,

работающих только на сжатие. В совокупности данные устройства моделируют упругие свойства основания и сопротивление сдвиговым нагрузкам с учетом пластических свойств податливых элементов.

Однако известные модели не могут адекватно учитывать сложную внутреннюю структуру откосного участка опорного сооружения, а также существующую тенденцию изменения плотности среды в направлении периферии, что должно отражаться на эпюре полей напряжений поперечного сечения в виде соответствующих смещений переуплотненных зон в сторону образующей откосной поверхности. В частности, реальное поведение откосного участка железнодорожного пути, нагруженного в области бровки призмы земляного полотна, сопровождается явлениями потери устойчивости грунта, оползания и скольжения.

Поведение откосного участка железнодорожного пути под воздействием динамической нагрузки опорного узла наиболее корректно описывается методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения, разработанным В. В. Соколовским [7]. На эпюрах векторного представления ускорений материала среды в теле призмы очевидно отображается формирующийся профиль круглоцилиндрических поверхностей скольжения (рис. 5 *а*), по которым происходит оползание породы.

Возникающие при ударном нагружении упруго-пластические волны (продольные, поперечные, поверхностные волны Реллея), интерферируя, образуют зоны концентрации напряжений, резонансные усиления, градиенты скоростей деформаций. Тенденции изменения местоположения зоны резонансных усилий, возникающих в грунте, определяют характерные очаги сдвига и зоны уплотнений (рис. 5 *б*), которые коррелируют с наблюдаемыми на практике.

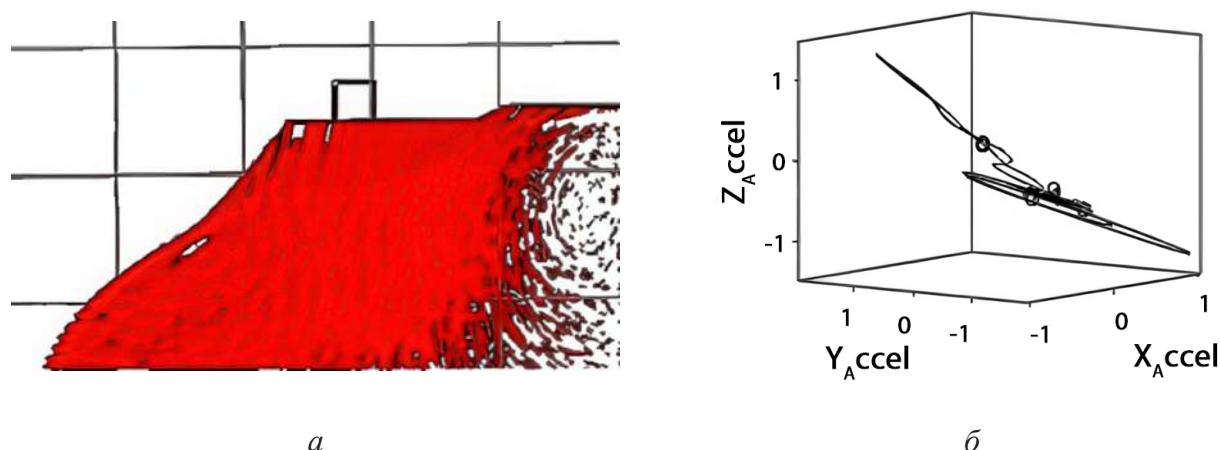


Рис. 5. Динамическое взаимодействие максимально нагруженной шпальной выкладки и откосной зоны земляного полотна: *а* — векторное представление ускорений; *б* — годограф перемещений точки контакта оголовка штока аутригера со шпальной выкладкой

Для корректного отражения местного динамического взаимодействия опорных устройств ЖССК и бровки откоса используется модель упрочняющегося грунта (HS) [22], являющаяся усовершенствованной моделью Мора — Кулона, созданной путем объединения нелинейных упругих и упругопластических моделей для реалистичного моделирования глинистых и песчаных грунтов. Главной особенностью модели HS является принятая гиперболическая зависимость между девиатором напряжений и относительной деформацией при первичном трехосном нагружении, а при разгрузке и повторном нагружении зависимость принимается линейной.

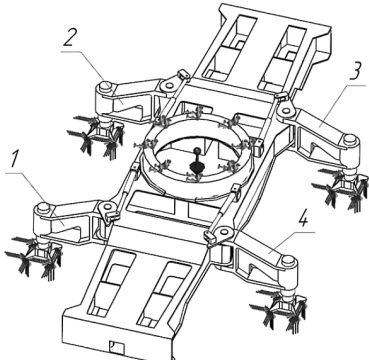
Полученная расчетная траектория перемещений (годограф) (рис. 5 б) точки контакта оголовка штока аутригера со шпальной выкладкой показывает диапазон изменения значений по отведениям в пределах 2 мм, что не превышает предельно допустимые деформационные смещения (5 мм) точки контакта относительно геометрической оси аутригера [1, 4, 20, 23].

Верификация численной модели ЖССК

Подтверждение корректного отражения физической реальности разработанной численной модели ЖССК «Сокол-80.01М» в настоящей работе выполнено путем сравнения результирующих сил (значений реакций выносных опор крановой установки), указанных в паспортных характеристиках крана, со значениями, полученными в ходе численного эксперимента в условиях адекватных внешних воздействий. Указанный параметр принят по следующим причинам: это интегральный показатель нагруженности всей конструкции; он напрямую связан с устойчивостью крана, нормируется в паспорте как критические параметры безопасности.

Значения реакций опор R_1, R_2, \dots, R_n для конкретных режимов работы определяются по результатам численного моделирования с учетом условий испытаний (грузовой момент M , вылет стрелы L , масса груза Q , положение опор) и соответствующих паспортных значений опорных реакций (см. табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Процент отклонения опорных реакций ЖССК
(паспорт крана / цифровая модель)

	№ аутригера	Вылет стрелы 10 м, груз 20 т		Вылет стрелы 17 м, груз 10 т	
		Паспорт / модель	% отклонения	Паспорт / модель	% отклонения
	№ 2, 3	515 kN / 511 kN	0,77	490 kN / 481 kN	1,83
	№ 1, 4	170 kN / 164 kN	3,53	145 kN / 158 kN	8,96

Расхождения значений опорных реакций находятся в допустимых пределах (менее 10%), модель считается верифицированной для заданных условий.

Заключение

Разработанная численная модель позволяет:

- строить единую численную модель всей системы (ЖССК — опорное сооружение), избегая потерь и искажений информации при раздельном анализе подсистем с последующей передачей граничных условий в следующую модель;
- описывать пространственные перемещения сопряженных элементов с учетом геометрии и кинематики сочленений, упруго-пластических деформаций;
- учитывать условия опирания крана на грунт, вводить структурные нелинейности (контакт, пластичность);
- отслеживать эволюцию конструкции в целом путем внесения изменений граничных условий на каждом шаге расчета;
- осуществлять подмоделирование (детальный анализ критических узлов в отдельной модели с граничными условиями из глобальной схемы).

Список источников

1. Распоряжение ОАО «РЖД» от 01.10.2019 № 2182/р «Об утверждении и вводе в действие инструктивных указаний по организации аварийно-восстановительных работ на инфраструктуре ОАО «РЖД» // СПС «КонсультантПлюс». 144 с.
2. Huber W. Tragfähigkeit von Teleskopen // *Forder und Heben*. 1972. No. 3. S. 125–127.
3. Потахов Д. А. Методы анализа состояния элементов опорного контура и устойчивости грузоподъемных кранов в процессе ненормируемого динамического нагружения: дисс. ... канд. техн. наук. СПб, 2021. 190 с.
4. Потахов Е. А. Методы оценки динамического нагружения элементов телескопического стрелового оборудования грузоподъемных кранов: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2022. 168 с.
5. Анцев В. Ю., Витчук П. В., Крылов К. Ю. Дефекты и отказы автомобильных кранов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2016. № 7–1. С. 88–93.
6. Нагруженность крановых телескопических стрел / В. А. Ряхин [и др.] // *Строительные и дорожные машины*. 1984. № 6. С. 9–11.
7. Пьянков С. А., Азизов З. К. *Механика грунтов: учебное пособие*. Ульяновск: УлГТУ, 2014. 169 с.
8. Шелмич Р. Р. Динамические нагрузки и устойчивость автокрана на упругом основании // *Строительные и дорожные машины*. 1996. № 4. С. 32–33.
9. Башкова Н. В. Исследование местной нагруженности телескопических стрел строительных кранов: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1978. 223 с.

10. Абрамович И. И., Березин В. Н., Яуре А. Г. Грузоподъемные краны промышленных предприятий: справочник. М.: Машиностроение, 1989. 360 с.
11. Паспорт восстановительного поезда: форма РБУ-4: утв. ОАО «РЖД» 21.06.2004 // СПС «КонсультантПлюс».
12. Вайнсон А. А. Подъемно-транспортные машины: учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование». 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 536 с.
13. Соломатина Л. А. Динамика поворота гидравлических стреловых самоходных кранов: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1984. 239 с.
14. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс, 2010. 464 с.
15. Исследование экстремальных режимов работы транспортных систем средствами SolidWorksMotion / Я. С. Ватулин [и др.] // Системы автоматизированного проектирования на транспорте, Санкт-Петербург, 17–19 апреля 2017 года. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2017. С. 28–43.
16. Cui Z., Jiang W., Cheng L. Analysis and experimental verification of the strength of telescopic booms for construction machinery // International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology. 2016. P. 33.1–33.10.
17. ГОСТ 3241-91. Канаты стальные. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2007. 21 с.
18. Смирнов А. С., Смольников Б. А. Движение сферического маятника со слабой нелинейностью при наличии внешнего или внутреннего трения // Современное машиностроение: Наука и образование — 2024: материалы 13-й Международной научной конференции (20 июня 2024 г.) / под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. СПб.: Политех-Пресс, 2024.
19. Савинов О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Стройиздат, 1979. 200 с.
20. Ватулин Я. С. Синтез силовых гидроцилиндров строительных кранов: дисс. ... канд. техн. наук. Тула, 1996. 223 с.
21. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наук. думка, 1976. 415 с.
22. Сокорнов А. А., Коньков А. Н. Моделирование и расчет подземных сооружений. Механические модели грунтов и строительных материалов: учеб. пособ. СПб.: СПГУПС, 2022.
23. Липатов А. С., Емельянова Г. А. Об учете ненормируемых условий эксплуатации при назначении показателей риска грузоподъемных кранов // Механизация строительства. 2014. № 5. С. 60–64.

Дата поступления: 02.12.2025

Решение о публикации: 11.02.2026

Контактная информация:

МУНЗАРОВ Илшат Назибович — аспирант; nttk@pgups.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, профессор; nttk@pgups.ru

ВАТАЕВ Андрей Сергеевич — канд. техн. наук, доцент; avataev@yandex.ru

ВАТУЛИН Ян Семенович — канд. техн. наук, доцент; yan-roos@yandex.ru

МАЙОРОВ Владимир Сергеевич — канд. техн. наук, доцент; nttk@pgups.ru

Numerically modelled stress-strain state of rail-mounted jib crane within a three-dimensional non-stationary framework

I. N. Munzarov¹, A. A. Vorobyov², A. S. Vatayev², Ya. S. Vatulin¹, V. S. Mayorov²

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

² Saint Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russia

For citation: *Munzarov I. N., Vorobyov A. A., Vatayev A. S., Vatulin Ya. S., Mayorov V. S.* Numerically modelled stress-strain state of rail-mounted jib crane within a three-dimensional non-stationary framework // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 112–127. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-112-127. (In Russian)

Abstract

Objective: a numerical model of a rail-mounted mobile boom crane was developed to determine the stress-strain state of the main load-bearing components of the metal structure within a three-dimensional non-stationary framework. **Methods:** computer-based simulation and numerical experimentation. **Results:** the dynamics of crane loading regimes associated with oscillations of a flexible load suspension induced by uneven settlement of ground supports and by transformations in the core of the support contour. **Practical Significance:** the proposed mathematical model of the rail-mounted mobile boom crane facilitates numerical investigation of the stress-strain behaviour of its structural elements in a three-dimensional non-stationary framework.

Keywords: rail-mounted self-propelled boom cranes, dynamic loading regime, outrigger settlement, loading regime dynamics, three-dimensional non-stationary setting, loss of soil stability in a sloped section of a railway track

References

1. Rasporyazhenie OAO “RZhD” ot 01.10.2019 no. 2182/r “Ob utverzhdenii i vvode v dejstvie Instruktivnykh ukazaniy po organizatsii avarijno-vosstanovitel’nykh работ na infrastrukture OAO “RZhD” // SPS “Konsul’tantPlyus”. 144 s. (In Russian)
2. Huber W. Tragfahigkeit von teleskopen // Forder und Heben. 1972. No. 3. S. 125–127.
3. Potakhov D.A. Metody analiza sostoyaniya elementov opornogo kontura i ustojchivosti gruzopod’emnykh kranov v protsesse nenormiruemogo dinamicheskogo nagruzheniya: diss. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2021. 190 s. (In Russian)

4. Potakhov E. A. Metody otsenki dinamicheskogo nagruzheniya elementov teleskopicheskogo strelovogo oborudovaniya gruzopod'emnykh kranov: diss. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2022. 168 s. (In Russian)
5. Antsev V. Yu., Vitchuk P. V., Krylov K. Yu. Defekty i otkazy avtomobil'nykh kranov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2016. No. 7–1. S. 88–93. (In Russian)
6. Nagruzhenost' kranovykh teleskopicheskikh strel / V. A. Ryakhin [i dr.] // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 1984. No. 6. S. 9–11. (In Russian)
7. P'yankov S. A., Azizov Z. K. Mekhanika gruntov: uchebnoe posobie. Ul'yanovsk: UIGTU, 2014. 169 s. (In Russian)
8. Shelmich R. R. Dinamicheskie nagruzki i ustojchivost' avtokrana na uprugom osnovanii // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 1996. No. 4. S. 32–33. (In Russian)
9. Bashkova N. V. Issledovanie mestnoj nagruzhenosti teleskopicheskikh strel stroitel'nykh kranov: diss. ... kand. tekhn. nauk. M., 1978. 223 s. (In Russian)
10. Abramovich, I. I., Berezin V. N., Yaure A. G. Gruzopod'emnye krany promyshlennykh predpriyatij: spravochnik. M.: Mashinostroenie, 1989. 360 s. (In Russian)
11. Passport vosstanovitel'nogo poezda: forma RBU-4: utv. OAO "RZhD" 21.06.2004 // SPS "Konsul'tantPlyus". (In Russian)
12. Vajnsjon A. A. Pod'emno-transportnye mashiny: uchebnik dlya vuzov po spetsial'nosti "Pod'emno-transportnye, stroitel'nye, dorozhnye mashiny i oborudovanie". 4-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1989. 536 s. (In Russian)
13. Solomatina L. A. Dinamika povorota gidravlicheskikh strelovykh samokhodnykh kranov: diss. ... kand. tekhn. nauk. M., 1984. 239 s. (In Russian)
14. Alyamovskij A. A. Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation. M.: DMK Press, 2010. 464 s. (In Russian)
15. Issledovanie ekstremal'nykh rezhimov raboty transportnykh sistem sredstvami SolidWorksMotion / Ya. S. Vatulin [i dr.] // Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya na transporte, Sankt-Peterburg, 17–19 aprelya 2017 goda. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2017. S. 28–43. (In Russian)
16. Cui Z., Jiang W., Cheng L. Analysis and experimental verification of the strength of telescopic booms for construction machinery // International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology. 2016. P. 33.1–33.10.
17. GOST 3241–91. Kanaty stal'nye. Tekhnicheskie usloviya. M.: Izdatel'stvo standartov, 2007. 21 s. (In Russian)
18. Smirnov A. S., Smol'nikov B. A. Dvizhenie sfericheskogo mayatnika so slaboj nelinejnost'yu pri nalichii vneshnego ili vnutrennego treniya goda / Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie — 2024: materialy 13-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii (20 iyunya 2024 g.) / pod red. A. N. Evgrafova i A. A. Popovicha. SPb.: Politekh-Press, 2024. (In Russian)
19. Savinov O. A. Sovremennye konstruksii fundamentov pod mashiny i ikh raschet. 2-e izd., pererab. i dop. L.: Strojizdat, 1979. 200 s. (In Russian)

20. Vatulin Ya. S. Sintez silovykh gidrotsilindrov stroitel'nykh kranov: diss. ... kand. tekhn. nauk. Tula, 1996. 223 s. (In Russian)

21. Pisarenko G. S., Lebedev A. A. Deformirovanie i prochnost' materialov pri sloznom napryazhenom sostoyanii. Kiev: Nauk. dumka, 1976. 415 s. (In Russian)

22. Sokornov A. A., Kon'kov A. N. Modelirovanie i raschet podzemnykh sooruzhenij. Mekhanicheskie modeli gruntov i stroitel'nykh materialov: ucheb. posob. SPb. PGUPS, 2022. (In Russian)

23. Lipatov A. S., Emel'yanova G. A. Ob uchete nenormiruemykh uslovij ekspluatatsii pri naznachenii pokazatelej riska gruzopod'emnykh kranov // Mekhanizatsiya stroitel'stva. 2014. No. 5. S. 60–64. (In Russian)

Received: 02.12.2025

Accepted: 11.02.2026

Author's information:

Ilshat N. MUNZAROV — Postgraduate Student; nttk@pgups.ru

Alexander A. VOROBIEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; nttk@pgups.ru

Andrey S. VATAEV — PhD in Engineering, Associate Professor; avataev@yandex.ru

Yan S. VATULIN — PhD in Engineering, Associate Professor; mayorov.pgups@gmail.com

Vladimir S. MAYOROV — PhD in Engineering, Associate Professor; nttk@pgups.ru

УДК 629.423.32

Система регулирования асинхронного тягового двигателя скоростного поезда

Т. С. Титова, П. Г. Колпахчян, А. С. Володина

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Титова Т. С., Колпахчян П. Г., Володина А. С. Система регулирования асинхронного тягового двигателя высокоскоростного поезда // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 128–141. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-128-141

Аннотация

Цель: определение подхода к построению системы автоматического регулирования (САР) и наблюдателя состояния асинхронного тягового двигателя для обеспечения регулирования момента с высоким качеством, без перерегулирования, с заданной точностью и быстродействием. **Методы:** выбор способа управления асинхронным тяговым двигателем (АТД) для обеспечения заданных характеристик является главным при дальнейшем определении методов для достижения поставленной цели. Поэтому в статье рассмотрены вопросы, касающиеся принципа управления и структуры САР для машины. Благодаря применению метода прямого управления моментом с регуляцией вектора потокосцепления через вектор напряжения имеется возможность получения предсказуемого гармонического состава напряжения и токов, а также обеспечение заданного быстродействия. Для устранения влияния накопления ошибок интегрирования и корректной работы наблюдателя состояния предлагается рассмотреть методы Эйлера и Адамса — Моултона для решения дифференциальных уравнений. **Результаты:** для оценки правильности выбранного подхода к построению САР и наблюдателя состояния АТД выполняется математическое моделирование процессов в тяговом электроприводе. Результаты моделирования демонстрируют, что применение САР, использующей принципы прямого управления моментом и управления по напряжению, обеспечивает хорошие динамические показатели регулирования. Высокое быстродействие регулирования момента при сравнительно низкой частоте переключений силовых полупроводниковых приборов инвертора реализуется при исключении контуров регулирования тока статора. Таким образом, появляется возможность эффективного использования условий сцепления в месте контакта «колесо — рельс». **Практическая значимость:** показана важность выбора способа управления АТД для обеспечения высокой точности, быстродействия и качества регулирования. Применение метода Адамса — Моултона второго порядка позволяет практически полностью устранить накопление погрешности при незначительном увеличении объема вычислений. Это обеспечивает эффективную работу наблюдателя состояния.

Ключевые слова: система автоматического регулирования асинхронного двигателя, обеспечение высокого качества регулирования, быстродействие регулирования, наблюдатель состояния, фильтр Льюенбергера, метод Адамса — Моултона

Введение

В настоящее время на электроподвижном составе перспективным является применение бесколлекторных тяговых двигателей — асинхронных и синхронных с постоянными магнитами на роторе. Высокая цена постоянных магнитов и технологические трудности изготовления электрических машин и их использования

являются причиной того, что на современном подвижном составе наибольшее распространение получили асинхронные тяговые двигатели (АТД). Помимо относительно простой конструкции, технологичности изготовления и надежности, их преимуществом является хорошее, близкое к предельному использование сцепного веса [1].

Коллекторные машины не позволяют так эффективно бороться с боксованием, и единственным решением остается подача песка под движущиеся колесные пары для увеличения сцепления с рельсом. С АТД есть возможность быстрого регулирования и сбрасывания момента для увеличения сцепного веса, что делает данный тип привода более перспективным.

Использование АТД требует реализации управления моментом с высокой точностью и быстродействием. Постоянная времени регулирования момента определяется исходя из условия подавления избыточного скольжения колесных пар и не должна превышать 3–5 мс как для локомотивов, так и для моторвагонного подвижного состава [1]. Достижение такого быстрого регулирования момента возможно только с использованием способов управления со стабилизацией потокосцепления АТД.

На современном электроподвижном составе тяговые двигатели имеют номинальную частоту токов статора, превышающую 70–80 Гц. На высокоскоростных поездах она может составлять 120–150 Гц, а максимальная частота достигает 200 Гц [2]. Тяговый инвертор выполняется на IGBT-модулях с допустимой частотой переключений около 1 кГц. При такой частоте переключений пульсации тока статора АТД могут возникнуть трудности для реализации системы векторного регулирования с контурами составляющих тока статора.

Формулировка проблемы

Выбор способа управления тяговым двигателем является главным для дальнейшей реализации поставленных целей. При выборе необходимо учитывать возможность выполнения следующих задач: регулирование момента с высоким качеством, без перерегулирования, точно и быстродействием, как было указано выше, не ниже 3–5 мс. В этом случае возможно эффективно бороться с боксованием и обеспечить близкое к предельному использование сцепного веса.

Системы автоматического регулирования АТД, использующие принципы векторного регулирования, строятся в системе координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора и предполагают использование контуров регулирования проекций тока статора [3]. Для реализации систем векторного управления оптимальным подходом является выбор системы координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора. Это позволяет создать систему автоматического регулирования со стабилизацией потокосцепления и осуществлять управление по напряжению с использованием контуров регулирования проекций

тока статора на оси выбранной системы координат. Достижение минимума потерь достигается за счет равенства постоянных и переменных потерь при постоянстве потокосцепления [5].

Однако использование контуров регулирования тока затруднено наличием больших пульсаций на высокоскоростных поездах, где частота модуляции тягового инвертора достаточно низкая по отношению к частоте выходного напряжения. Поэтому возникает проблема фильтрации сигналов тока. Для этого необходимо использовать фильтры со значительным сглаживанием, применение которых ведет к запаздыванию сигналов по фазе. Данное запаздывание приводит к снижению быстродействия регулирования, поэтому целесообразно использовать подход, исключающий наличие контуров регулирования составляющих тока статора.

При отказе от контуров тока и переходе к методу прямого управления моментом частота переключения силовых полупроводниковых приборов может достигать значительной величины и приводить к перегреву приборов, что является недопустимым. Кроме того, моменты переключения не имеют строго определенной последовательности. В результате гармонический состав тока системы тягового электроснабжения в контактной сети и рельсах будет иметь непредсказуемый спектральный состав, что отрицательно влияет на работу систем автоматической блокировки и связи, таких как АЛСН и СЦБ.

Подход, заключающийся в регулировании вектора потокосцепления через вектор напряжения, позволит получить предсказуемый гармонический состав напряжения и токов. Применение модуляции с контролируемым гармоническим составом даст возможность выполнить данную задачу, избавив низкочастотную часть спектра от нежелательных гармоник.

По указанным выше причинам для создания системы автоматического регулирования момента АТД высокоскоростного поезда целесообразно использовать систему автоматического регулирования без контуров регулирования тока, основанную на применении способа прямого управления моментом. Далее будут рассмотрены вопросы построения системы управления и наблюдателя состояния, которые позволят реализовать поставленные задачи.

Принцип управления и структура системы автоматического регулирования момента асинхронной электрической машины

В рассматриваемом случае питание АТД реализуется по схеме с явно выраженным звеном постоянного тока и использованием двухуровневого автономного инвертора напряжения (АИН) [4]. На рис. 1 представлена упрощенная схема силовых цепей. АИН функционирует в качестве источника напряжения, параметры которого (величина и частота) регулируются. Система управления АИН в качестве исходных данных принимает значения амплитуды и углового положения вектора

напряжения статора. Для этого могут быть задействованы методы синусоидальной ШИМ, пространственно-векторной ШИМ или ШИМ с подавлением выбранных гармоник (Selective Harmonic Elimination) [4].

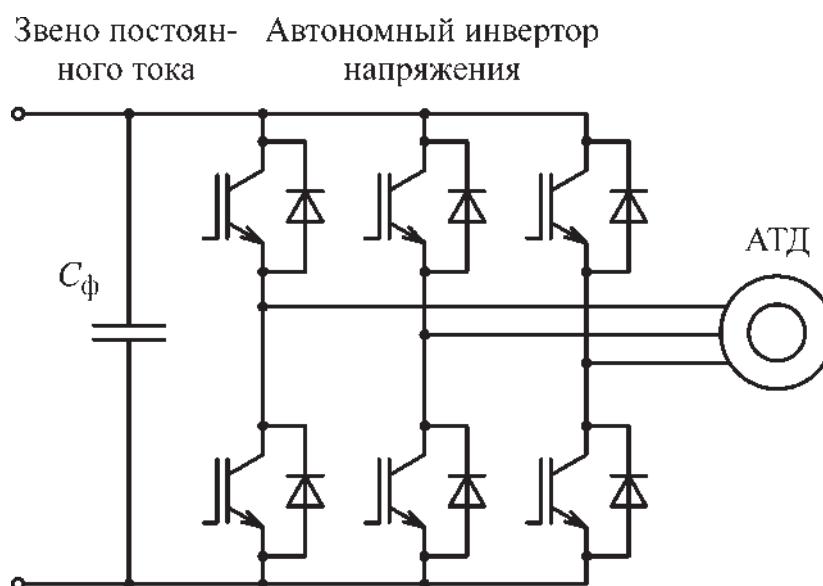


Рис. 1. Упрощенная схема силовых цепей тягового электропривода с АТД

В представленной системе автоматического регулирования (САР) для асинхронного тягового двигателя (АТД) применяется метод прямого управления моментом (DTC) [3]. Традиционная реализация DTC имеет существенный недостаток, заключающийся в невозможности контроля за гармоническим составом момента и тока в звене постоянного тока, а также за частотой переключения силовых полупроводниковых приборов. Для устранения данного ограничения рассматриваемая САР предполагает формирование вектора напряжения обмоток статора. Архитектура САР основана на математической модели асинхронной электрической машины, описываемой с использованием Г-образной схемы замещения, представленной на рис. 2.

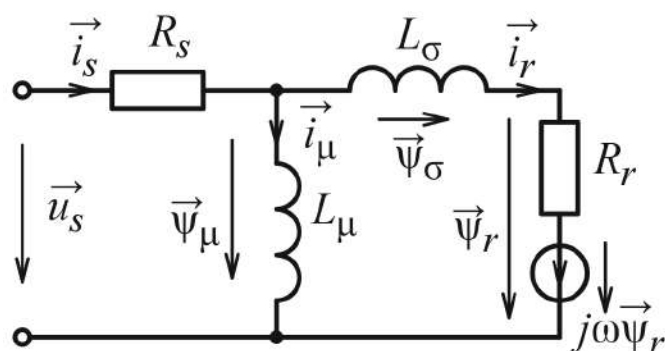


Рис. 2. Схема замещения асинхронной электрической машины с контуром намагничивания, вынесенным на зажимы статора

Электромагнитные процессы в АД, представленном схемой замещения с выведенным на зажимы статора контуром намагничивания (рис. 2), описываются уравнениями:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{\Psi}_\mu}{dt} = \vec{u}_s - R_s \vec{i}_s; \\ \frac{d\vec{\Psi}_r}{dt} = R_r \vec{i}_r + j\omega \vec{\Psi}_r, \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{u}_s, \vec{\Psi}_\mu, \vec{\Psi}_r, \vec{i}_s, \vec{i}_r$ — пространственные векторы напряжения статора, потокосцепления и токов статора и ротора;

R_s — активное сопротивление цепи статора;

$L_\mu = \sigma_{12} L_m$ — индуктивность контура намагничивания;

$L_\sigma = \sigma_{12} L_{\sigma s} + \sigma_{12}' L_{\sigma r}$ — индуктивность рассеяния;

$R_r = \sigma_{12}' r_r'$ — активное сопротивление ротора;

$\sigma_{12} = 1 + L_{\sigma s} / L_m$ — коэффициент рассеяния;

$L_m, L_{\sigma s}, L_{\sigma r}, r_r'$ — параметры Т-образной схемы замещения АД [6].

Ток статора определяется из уравнений магнитной связи:

$$\vec{i}_s = \vec{i}_\mu + \vec{i}_r = \left[\frac{1}{L_\sigma} + \frac{1}{L_\mu} \right] \vec{\Psi}_\mu - \frac{1}{L_\sigma} \vec{\Psi}_r \quad (2)$$

С учетом (2) система уравнений (1) может быть записана в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\vec{\Psi}_\mu}{dt} \\ \frac{d\vec{\Psi}_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s \left(\frac{1}{L_\mu} + \frac{1}{L_\sigma} \right) - jw_B & \frac{R_s}{L_\sigma} \\ \frac{R_r}{L_\sigma} & -\frac{R_r}{L_\sigma} + j(w - w_B) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{\Psi}_\mu \\ \vec{\Psi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{u}_s \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Электромагнитный момент может быть найден с использованием выражения:

$$M_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{1}{L_\sigma} |\vec{\Psi}_\mu| \cdot |\vec{\Psi}_r| \cdot \sin(\theta). \quad (4)$$

Задачей регулирования АД является управление процессом электромеханического преобразования (создания требуемого электромагнитного момента) с заданным быстродействием. Во избежание чрезмерных отклонений от заданного значения и нежелательных низкочастотных колебаний при изменении рабочего режима двигателя важно обеспечить стабилизацию магнитного потока АД. Когда САР моментом строится на основе выражения (2), стабилизируется потокосцепление статора. Величина этого потокосцепления поддерживается на требуемом

уровне посредством управляющих воздействий, а угол между векторами потоко-сцепления статора и ротора используется для регулирования момента.

Графическое представление конечной точки вектора магнитного потока ста-тора является многоугольником, отображающим его траекторию (годограф), как это показано на рис. 3. При повышении частоты модуляции выходного напряже-ния АИН форма траектории вектора потоко-сцепления статора стремится к форме окружности. Радиус данного круга задается посредством управления величиной потоко-сцепления статора. Скорость перемещения вектора, или угловой шаг в дис-кретной системе, устанавливается регулятором момента. В рамках дискретной системы управления предполагается, что интервал модуляции ΔT_m , составляющий половину периода модуляции АИН, значительно меньше как постоянной времени рассеяния ротора $T_\sigma = L_\sigma/R_r$, так и периода основной гармоники T_s .

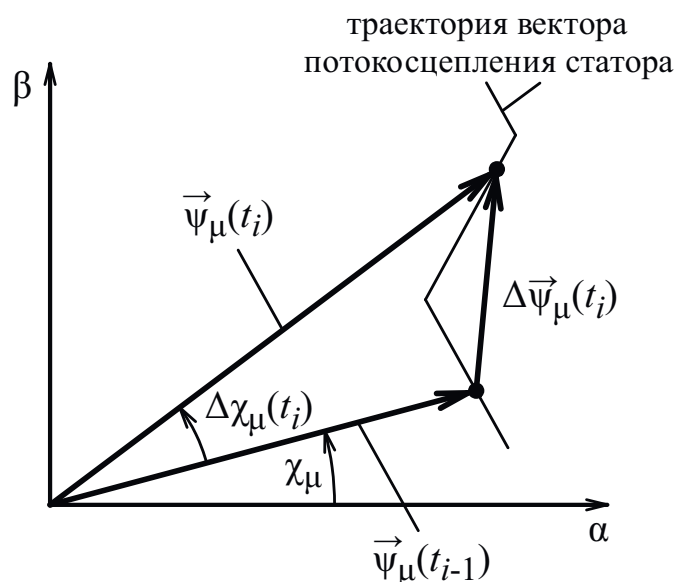


Рис. 3. Пространственное расположение векторов АД

На рис. 3 указано расположение вектора потоко-сцепления статора в началь-ный и конечный момент временного интервала модуляции ΔT_m , который соответ-ствует длительности цикла работы дискретной системы управления. В общем случае вектор потоко-сцепления ротора изменяет свою длину на величину $\Delta \Psi_\mu(t_j)$ и поворачивается на угол $\Delta \chi_\mu(t_j)$:

$$\vec{\Psi}_\mu(t_j) = \left[(1 + k_\psi) \cdot e^{j\Delta\chi_\mu(t_j)} \right] \cdot \vec{\Psi}_\mu(t_{j-1}),$$

а его изменение оказывается равным:

$$\Delta \vec{\Psi}_\mu(t_j) = \vec{\Psi}_\mu(t_j) - \vec{\Psi}_\mu(t_{j-1}) = \left[(1 + k_\psi) \cdot e^{j\Delta\chi_\mu(t_j)} - 1 \right] \cdot \vec{\Psi}_\mu(t_{j-1}).$$

В данном случае вектор напряжения статора на текущем шаге работы дискретной системы регулирования равен:

$$\vec{u}_s(t_j) = \frac{\Delta \vec{\Psi}_s(t_j)}{\Delta T_m}.$$

Наблюдатель состояния тягового асинхронного двигателя на основе фильтра Люенбергера

Наблюдатель состояния играет важную роль в системе управления АД, обеспечивая определение положения вектора потокосцепления. Его показатели напрямую влияют на критически важные параметры регулирования, включая быстродействие и точность, так как расчет ведется в режиме реального времени. Точность параметров асинхронной машины способна влиять на работу наблюдателя. Так, в случае значительных отклонений параметров двигателя от действительных работа фильтра затрудняется ввиду больших отклонений величин и возможности появления неустойчивости [7].

Наблюдатель состояния — это модель, которая интегрируется с объектом управления и отслеживает динамику регулирующих параметров, предоставляя информацию об их изменениях [8]. При оперировании данными о входных и выходных сигналах, а также при использовании известных данных структурных особенностей и параметров самой системы становится возможным определение ее внутреннего состояния. Синтез наблюдателя базируется на представлении динамики системы в виде дифференциального уравнения, сформулированного в матричной форме [5]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}[x] = [A][x] + [B][u]; \\ [y] = [C][x], \end{cases} \quad (5)$$

где $[x]$ — вектор переменных состояния системы;

$[u]$ — вектор управляющих воздействий;

$[A]$, $[B]$ — матрицы коэффициентов перед векторами состояния и управляющих воздействий, описывающие динамику системы и ее реакцию на внешние воздействия;

$[y]$ — вектор измеряемых величин;

$[C]$ — матрица преобразования для перехода от переменных состояния к измеряемым величинам.

Для определения матриц, входящих в систему уравнений (1), используется описание асинхронного двигателя с помощью теории обобщенной электрической машины (1) и (4), приведенное выше:

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -\left(\frac{r_s + K_p}{L_\mu} + \frac{r_s + K_p}{L_\sigma}\right) & 0 & \frac{r_s + K_p}{L_\sigma} & 0 & K_i & 0 \\ 0 & -\left(\frac{r_s + K_p}{L_\mu} + \frac{r_s + K_p}{L_\sigma}\right) & 0 & \frac{r_s + K_p}{L_\sigma} & 0 & K_i \\ \frac{R'r}{L_\sigma} & 0 & -\frac{R'r}{L_\sigma} & p \cdot \omega & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R'r}{L_\sigma} & -p \cdot \omega & -\frac{R'r}{L_\sigma} & 0 & 0 \\ -\left(\frac{1}{L_\mu} + \frac{1}{L_\sigma}\right) & 0 & \frac{1}{L_\sigma} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\left(\frac{1}{L_\mu} + \frac{1}{L_\sigma}\right) & 0 & \frac{1}{L_\sigma} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \left(\frac{1}{L_\mu} + \frac{1}{L_\sigma}\right) & 0 & -\frac{1}{L_\sigma} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{L_\mu} + \frac{1}{L_\sigma}\right) & 0 & -\frac{1}{L_\sigma} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & K_p & 0 \\ 0 & 1 & 0 & K_p \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Выражение, записанное в пространстве состояний для наблюдателя состояния, представляет собой систему дифференциальных уравнений. Ее можно решить с помощью метода Эйлера:

$$[x]_{n+1} = [x]_n + \Delta t \cdot \frac{d}{dt}[x]_n = [x]_n + \Delta t \cdot ([A][x]_n + [B][u]_n).$$

Результаты предварительных расчетов показали, что применение метода Эйлера с шагом интегрирования по времени, соответствующему периоду работы САР, не позволяет обеспечить необходимой точности определения наблюдаемых величин. Так как переменные интегрирования являются периодическими сигналами, накопление ошибки интегрирования приводит к отклонению наблюдаемых векторов потокосцепления статора и ротора по амплитуде и фазе от реальных значений. Это приводит к ухудшению качества регулирования момента и может вызывать неустойчивость САР.

Для устранения влияния накопления ошибок интегрирования целесообразно использовать неявные методы решения дифференциальных уравнений. Одним из наиболее простых и эффективных с точки зрения реализации в микропроцессорной системе управления является метод Адамса — Моултона второго порядка [10, 11]. Решение уравнений наблюдателя состояния выполняется в два этапа. Сначала выполняется прогноз методом Эйлера:

$$[x]_{n+1}^p = [x]_n + \Delta t \cdot \frac{d}{dt}[x]_n = [x]_n + \Delta t \cdot ([A][x]_n + [B][u]_n).$$

Затем проводится коррекция:

$$[x]_{n+1} = [x]_n + \frac{\Delta t}{2} \cdot ([A][x]_n + [A][x]_{n+1}^p + 2[B][u]_n).$$

Анализ результатов работы наблюдателя состояния АД в составе САР показал, что применение метода Адамса — Моултона второго порядка позволяет практически полностью устранить накопление погрешности при незначительном увеличении объема вычислений.

Моделирование процессов в тяговом электроприводе с САР на основе принципов ДТС и наблюдателем на основе фильтра Люенбергера

Для оценки правильности выбранного подхода к построению САР и наблюдателя состояния АД было выполнено математическое моделирование процессов в тяговом электроприводе высокоскоростного поезда с АД. В расчетах использовались параметры тягового двигателя, аналогичные применяемому на поездах «Сапсан»:

$P_n = 500$ кВт — номинальная мощность;

$f_{sn} = 60$ Гц — номинальная частота тока статора;

$m = 3$ — количество фаз статора;

$p = 2$ — число пар полюсов;

$L_m = 0,0341$ Гн — индуктивность контура намагничивания;

$L_{\sigma s} = 0,0015$ Гн — индуктивность рассеяния статора;

$L'_{\sigma r} = 0,0031$ Гн — индуктивность рассеяния ротора, приведенная к статору;

$r_s = 0,098$ Ом — активное сопротивление статора;

$r'_r = 0,069$ Ом — активное сопротивление ротора, приведенное к статору.

Моделирование выполнялось для следующих условий. Напряжение в звене постоянного тока равно 2800 В, модуляция выходного напряжения АИН выполняется с использованием ШИМ с подавлением выбранных гармоник с тремя контролируемыми гармониками. При номинальной частоте вращения АД частота переключения силовых полупроводниковых приборов АИН составляет около 800 Гц. В начале расчета АД вращается с номинальной скоростью, задание момента равно нулю. В момент времени 10 мс на вход САР подается задание момента, равное номинальному значению. Результаты расчетов приведены на рис. 4. Показаны зависимости линейного напряжения и фазного тока, потокосцеплений статора и ротора, электромагнитного момента.

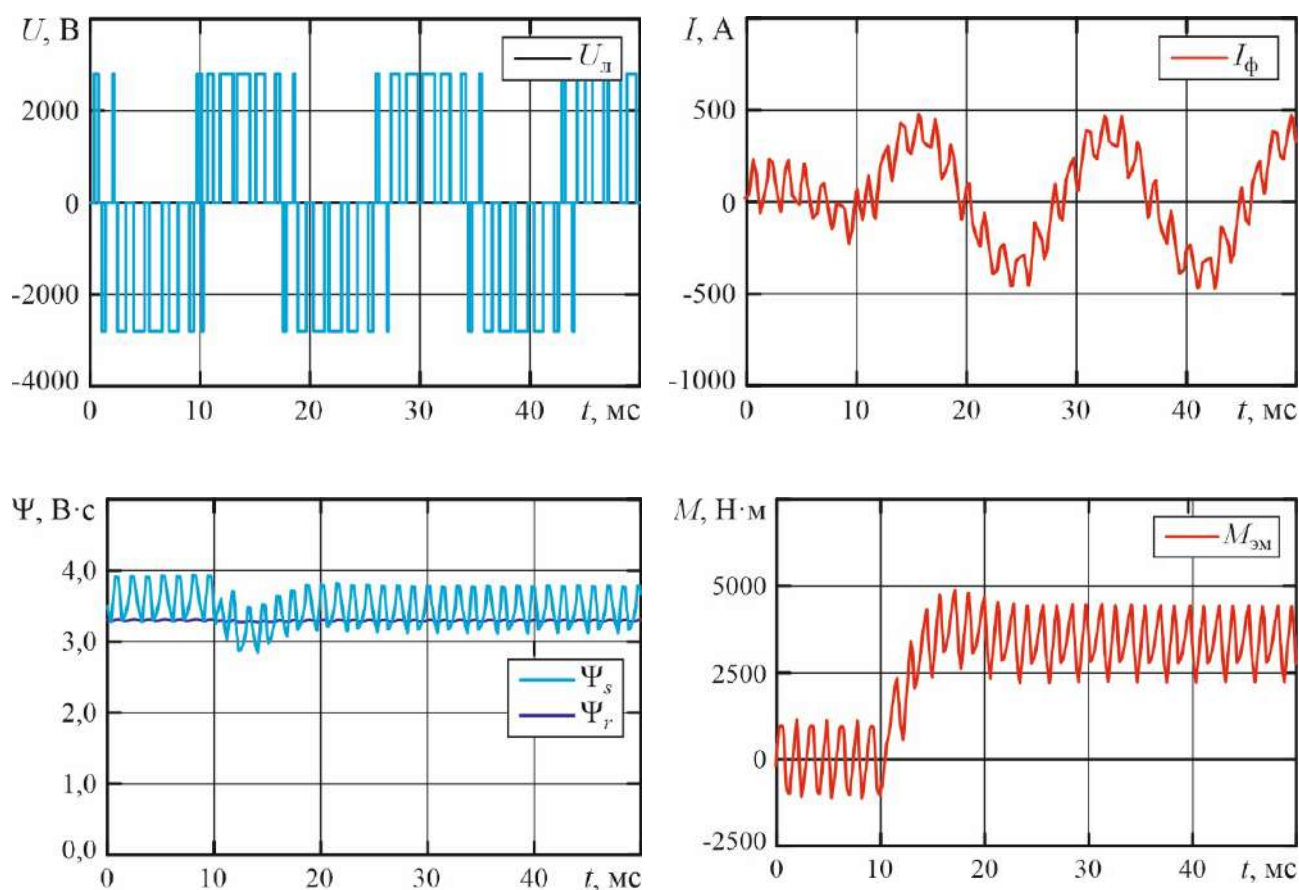


Рис. 4. Результаты расчета процессов в ТЭП высокоскоростного поезда с АД: U_L , I_ϕ — линейное напряжение и фазный ток АД; ψ_s , ψ_r — потокосцепления статора и ротора АД; $M_{эм}$ — электромагнитный момент АД

Анализ результатов моделирования показывает, что применение САР, использующей принципы прямого управления моментом и управления по напряжению, обеспечивает хорошие динамические показатели регулирования. Исключение

контуров регулирования составляющих тока статора позволяет получить высокое быстродействие регулирования момента при сравнительно низкой частоте переключений силовых полупроводниковых приборов АИН. Полученные показатели регулирования позволяют обеспечить эффективное использование условий сцепления в месте контакта «колесо — рельс».

Выводы

Определение оптимального метода управления тяговым двигателем играет ключевую роль в реализации системы управления тяговыми двигателями высокоскоростных поездов. Использование АТД требует реализации управления моментом с высокой точностью и быстродействием. Быстродействие регулирования момента становится возможным благодаря применению системы автоматического регулирования без контуров регулирования тока, основанной на способе прямого управления моментом, который заключается в регулировании вектора потокосцепления через вектор напряжения.

В системе управления АТД важную роль играет наблюдатель состояния. Точное определение положения и величины наблюдаемых величин, таких как потокосцепление статора и электромагнитный момент, во многом определяют точность и динамические показатели системы автоматического регулирования. Для рассматриваемой системы управления рациональным является применение наблюдателя состояния на основе фильтра Люенбергера. Использование метода Адамса — Моултона позволяет обеспечить работу наблюдателя с необходимой точностью.

Результаты математического моделирования процессов в тяговом электроприводе высокоскоростного поезда с АТД показали, что рассмотренный подход к построению системы автоматического регулирования позволяет обеспечить быстродействие регулирования момента, обеспечивающее эффективное использование условий сцепления в месте контакта «колесо — рельс».

Список источников

1. Асинхронный тяговый привод локомотивов / А. А. Андрющенко [и др.]. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. 412 с.
2. Назаров А. С. Опыт запуска в России высокоскоростных поездов «Сапсан» и «Аллегро» // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2013. № 3 (23). С. 62–68.
3. Усольцев А. А. Векторное управление асинхронными двигателями. СПб.: СПбГИТ-МО (ТУ), 2002. 42 с.
4. Speed-sensorless stator flux-oriented control of induction motor drives in traction / M. Depenbrock [et al.] // Communications — Scientific Letters of the University of Zilina. 2001. Vol. 3, no. 2. Pp. 68–75. DOI: 10.26552/com.C.2001.2-3.68-75.

5. Исаков А. С., Ушаков А. В. Реализация наблюдателя состояний асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в бездатчиковой системе векторного управления // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 38. С. 280–286. EDN JVJXXJ.

6. Костенко М. П. Электрические машины. Специальная часть. М.-Л.: Госэнергоиздательство, 1949. 712 с.

7. Traction induction motor state observer based on an luenberger filter / P. Kolpakhchyan, [et al.] // Proceedings of the Seventh International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-43792-2_25.

8. Попов С. А., Фальков Г. А. Особенности построения имитационной модели наблюдателя состояния для систем векторного управления асинхронным электроприводом // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 7. С. 40–47. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40083> (дата обращения: 08.02.2026).

9. Jnayah S., Moussa I., Khedher A. IM fed by three-level inverter under DTC strategy combined with sliding mode theory // Electronics. 2022.

10. Garrappa R. Numerical solution of fractional differential equations: a survey and a software tutorial // Mathematics. 2018. Vol. 6 (2). Pp. 30–53.

11. Ким В. А. Методы Адамса — Башфорта — Моултона и Ньютона — Рафсона для численного анализа осциллятора дuffинга с производной переменного дробного порядка римана-лиувилля // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2021. № 3 (33). С. 82–97. EDN TNWNML.

Дата поступления: 05.02.2026

Решение о публикации: 04.03.2026

Контактная информация:

ТИТОВА Тамила Семеновна — д-р техн. наук, профессор; titova@pgups.ru

КОЛПАХЧЬЯН Павел Григорьевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электрическая тяга»; kolpakhchyan@pgups.ru

ВОЛОДИНА Алена Сергеевна — студент; volodinaalena2016.volodina@yandex.ru

Control system for an induction traction motor in high-speed trains

T. S. Titova, P. G. Kolpakhch'yan, A. S. Volodina

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Titova T. S., Kolpakhch'yan P. G., Volodina A. S. Control system for an induction traction motor in high-speed trains // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 128–141. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-128-141. (In Russian)*

Abstract

Objective: to establish a methodology for designing an automatic control system (ACS) and a corresponding state observer for induction traction motors (ITM), specifically to guarantee high-precision torque regulation characterized by defined accuracy, rapid dynamic response, and the absence of overshoot. **Methods:** the foundational step in achieving the stated objective lies in selecting an optimal control strategy for the ITM that guarantees the necessary performance metrics. Consequently, this paper investigates the core principles of control and structural configuration of the motor's ACS. This study advocates for the implementation of Direct Torque Control (DTC). By regulating the flux-linkage vector via the voltage vector, this method offers distinct advantages, including a predictable harmonic spectrum for both currents and voltages, alongside the requisite dynamic behavior. Furthermore, to mitigate the accumulation of integration errors and ensure the robust functionality of the state observer, the research proposes utilizing numerical solutions for differential equations based on the Euler and Adams — Moulton methods. **Results:** to validate the proposed design methodology for the ACS and the ITM state observer, comprehensive mathematical modelling of the traction electric drive system has been conducted. The simulation data confirms that an ACS based on the principles of direct torque and voltage control delivers superior dynamic regulation capabilities. Notably, the system achieves rapid torque control while maintaining a comparatively low switching frequency for the inverter's power semiconductor components. This efficiency is largely attributed to the removal of stator current control loops, which subsequently allows for optimal utilization of wheel-rail adhesion conditions. **Practical significance:** the study underscores the critical importance of selecting a suitable ITM control strategy to secure high precision, speed, and the overall control quality. Employing the second-order Adams-Moulton method effectively neutralizes error accumulation with minimal additional computational load. This mathematical adjustment is instrumental in ensuring the efficient and reliable operation of the state observer in practical applications.

Keywords: automatic control system of an induction motor, ensuring high-quality control, rapid response, state observer, Luenberger filter, Adams-Moulton method

References

1. Asinkhronnyj tyagovyy privod lokomotivov / A.A. Andryushchenko [i dr.]. M.: Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zhelezodorozhnom transporte, 2014. 412 s. (In Russian)
2. Nazarov A. S. Opyt zapuska v Rossii vysokoskorostnykh poezdov “Sapsan” i “Allegro” // Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolij: Tekhnika zheleznykh dorog. 2013. No. 3 (23). S. 62–68. (In Russian)
3. Usol'tsev A. A. Vektornoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami. SPb.: SPbGIT-MO (TU), 2002. 42 s. (In Russian)
4. Speed-sensorless stator flux-oriented control of induction motor drives in traction / M. Depenbrock [et al.] // Communications — Scientific Letters of the University of Zilina. 2001. Vol. 3, no. 2. Pp. 68–75. DOI: 10.26552/com.C.2001.2-3.68-75.

5. Isakov A. S., Ushakov A. V. Realizatsiya nablyudatelya sostoyanij asinkhronnogo dvigate-lya s korotkozamknutym rotorom v bezdatchikovoj sisteme vektornogo upravleniya // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki. 2007. No. 38. S. 280–286. EDN JVJXXJ. (In Russian)
6. Kostenko M. P. Elektricheskie mashiny. Spetsial'naya chast'. M.-L.: Gosenergoizdatel'stvo, 1949. 712 s. (In Russian)
7. Traction induction motor state observer based on an luenberger filter / P. Kolpakhchyan, [et al.] // Proceedings of the Seventh International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-43792-2_25.
8. Popov S. A., Fal'kov G. A. Osobennosti postroeniya imitatsionnoj modeli nablyudatelya sostoyaniya dlya sistem vektornogo upravleniya asinkhronnym elektroprivodom // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2024. No. 7. S. 40–47. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40083> (data obrashcheniya: 08.02.2026). (In Russian)
9. Jnayah S., Moussa I., Khedher A. IM fed by three-level inverter under DTC strategy combined with sliding mode theory // Electronics. 2022.
10. Garrappa R. Numerical solution of fractional differential equations: a survey and a software tutorial // Mathematics. 2018. Vol. 6 (2). Pp. 30–53.
11. Kim V. A. Metody Adamsa — Bashforta — Moultona i N'yutona — Rafsona dlya chislennogo analiza ostsillyatora duffinga s proizvodnoj peremennogo drobnogo poryadka rimana-liuvillya // Problemy vychislitel'noj i prikladnoj matematiki. 2021. No. 3 (33). S. 82–97. EDN TNWNML. (In Russian)

Received: 05.02.2026

Accepted: 04.03.2026

Author's information:

Tamila S. TITOVA — Dr. Sci. in Engineering, Professor; titova@pgups.ru

Pavel G. KOLPAKHCH'YAN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of “Electric Traction”; kolpakhchyan@pgups.ru

A. S. VOLODINA — Student; volodinaalena2016.volodina@yandex.ru

УДК 629.4.018

Многоклассовая классификация технического состояния дизельного двигателя тепловоза по вейвлет-признакам вибросигналов методами машинного обучения

А. А. Беляев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Беляев А. А. Многоклассовая классификация технического состояния дизельного двигателя тепловоза по вейвлет-признакам вибросигналов методами машинного обучения // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 142–153. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-142-153

Аннотация

Цель: разработка и экспериментальная апробация алгоритма многоклассовой классификации технического состояния дизельного двигателя тепловоза на основе вейвлет-признаков вибросигналов с применением методов машинного обучения для обеспечения надежности и безопасности железнодорожного транспорта. **Методы:** экспериментальные исследования проводились на дизельном двигателе Д50 в Тепловозной лаборатории имени профессора Я. М. Гаккеля Петербургского государственного университета путей сообщения. Зарегистрирован 491 трехосевой вибросигнал в семи диагностических состояниях (исправное состояние и шесть вариантов имитации неисправности топливоподачи путем отключения подачи топлива в отдельные цилиндры). Вейвлет-пакетная декомпозиция до 11-го уровня с вейвлетом Добеши 4-го порядка позволила извлечь 45 984 диагностических признака из узлов декомпозиции. Для снижения размерности признакового пространства применен метод главных компонент (PCA) с порогом сохранения 95 % объясненной дисперсии. Проведено сравнительное исследование восьми методов машинного обучения с использованием стратифицированной пятикратной кросс-валидации для объективной оценки обобщающей способности моделей. **Результаты:** логистическая регрессия с L1-регуляризацией достигла наивысшей точности классификации 99,32 % (Accuracy = 0,9932, F1-macro = 0,9921). Стратифицированная кросс-валидация подтвердила стабильность и воспроизводимость результатов: F1-macro = 99,56 % ± 0,55 %. Метод продемонстрировал минимальную дисперсию среди всех исследованных алгоритмов, что свидетельствует о высокой устойчивости к вариациям в данных. **Практическая значимость:** экспериментально подтверждена возможность автоматической классификации дизельного двигателя по диагностическим классам на основе вейвлет-признаков вибросигналов. Логистическая регрессия выбрана как оптимальный метод благодаря сочетанию высокой точности, стабильности результатов и интерпретируемости модели. Разработанный алгоритм может быть использован в качестве основы для создания бортовых систем диагностики тепловозов в режиме реального времени.

Ключевые слова: машинное обучение, классификация, логистическая регрессия, L1-регуляризация, вейвлет-анализ, вибродиагностика, дизельный двигатель, тепловоз, анализ главных компонент, кросс-валидация

Введение

Развитие эффективных методов диагностики технического состояния дизельных двигателей тепловозов представляет собой одну из ключевых задач обеспечения надежности и безопасности железнодорожного транспорта.

Возрастающие требования к надежности эксплуатации тепловозного парка обуславливают необходимость создания высокоточных систем автоматического диагностирования, способных обнаруживать зарождающиеся дефекты на ранних стадиях их развития [1, 2].

Вибрационная диагностика является одним из наиболее информативных методов оценки технического состояния дизельных двигателей [3, 4]. Виброакустические сигналы содержат информацию о динамических процессах в узлах силовой установки, позволяя выявлять нарушения в работе цилиндра-поршневой группы, кривошипно-шатунного механизма, систем газораспределения и топливоподачи.

Вейвлет-преобразование обеспечивает одновременную локализацию сигнала во временной и частотной областях, что делает его оптимальным инструментом для анализа нестационарных вибросигналов [5, 6]. Многомасштабная структура вейвлет-декомпозиции позволяет одновременно анализировать сигнал на различных уровнях детализации.

Применение методов машинного обучения для классификации технического состояния механических систем по вибрационным сигналам активно развивается в последние годы [7, 8]. Особую актуальность представляют методы, обеспечивающие одновременно высокую точность классификации и интерпретируемость результатов, что критически важно для практического применения.

Цель настоящего исследования — разработка и экспериментальная апробация алгоритма многоклассовой классификации технического состояния дизельного двигателя Д50 на основе вейвлет-признаков вибросигналов с использованием методов машинного обучения.

Материалы и методы

Объект исследования и экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводились в Тепловозной лаборатории имени профессора Я. М. Гаккеля Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). Источником экспериментальных данных служил четырехтактный дизельный двигатель Д50 производства Коломенского завода со следующими характеристиками: номинальная мощность — 735 кВт, частота вращения коленчатого вала — 750 об/мин, шесть цилиндров рядного расположения.

Для регистрации вибрационных процессов использовался цифровой трехосевой виброметр ZET 7152-N (производство ООО «ЭТМС», Россия) с преобразователем интерфейса ZET 7174 (CAN 2.0 ↔ USB). Виброметр обеспечивает измерение виброускорения в диапазоне от 0,01 до 50 м/с² в полосе частот от 3 до 200 Гц по трем взаимно перпендикулярным осям [3, 4]. Датчик установлен на верхней плоскости блока цилиндров между крышками 3-го и 4-го цилиндров с использованием магнитного крепления. Частота дискретизации составляла 200 Гц.

Контролируемое моделирование неисправностей осуществлялось путем программного отключения подачи топлива в отдельные цилиндры двигателя. Экспериментальная программа включала регистрацию вибросигналов для семи диагностических классов: класс 0 — исправное состояние (все цилиндры работают); классы 1–6 — отключение подачи топлива в цилиндры № 1–6 соответственно.

В результате проведения экспериментальных исследований был зарегистрирован 491 вибросигнал. Распределение данных по диагностическим классам представлено в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Распределение экспериментальных данных по диагностическим классам

Класс	Техническое состояние	Количество сигналов	Доля от общего объема, %
0	Исправное состояние	114	23,2
1	Отключение цилиндра № 1	62	12,6
2	Отключение цилиндра № 2	63	12,8
3	Отключение цилиндра № 3	60	12,2
4	Отключение цилиндра № 4	60	12,2
5	Отключение цилиндра № 5	61	12,4
6	Отключение цилиндра № 6	71	14,5
Всего	—	491	100,0

Извлечение диагностических признаков

Для декомпозиции вибросигналов применялось вейвлет-пакетное преобразование с использованием вейвлета Добеши 4-го порядка (db4) [5, 6]. Максимальный уровень декомпозиции определялся длиной анализируемых сигналов [5]:

$$L_{\max} = \log_2(N), \quad (1)$$

где N — длина сигнала в отсчетах.

Для вибросигналов длиной $N = 2100$ отсчетов максимальный уровень составил $L_{\max} = 11$, что обеспечивало разбиение частотного диапазона на $2^{11} = 2048$ равных частотных полос.

Из каждого узла вейвлет-декомпозиции (j, k) извлекался комплексный набор из 30 диагностических характеристик, сгруппированных в семь категорий [7]: базовые статистические моменты (среднее значение, стандартное отклонение, асимметрия, эксцесс); амплитудные характеристики (среднеквадратичное значе-

ние, пиковое значение, пик-фактор, форм-фактор, коэффициент импульсности, коэффициент зазора); перцентили и меры разброса (10-й, 25-й, 50-й, 75-й, 90-й перцентили, межквартильный размах, коэффициент вариации); спектральные характеристики (спектральный центроид, спектральный разброс, спектральная асимметрия, спектральный эксцесс, спектральная энтропия); энтропийные характеристики (энтропия, временная энтропия); автокорреляционные признаки (автокорреляция с лагами 1, 5, 10, значение следующего пика); энергетические характеристики (энергия узла, нормализованная энергия).

Общее количество извлеченных признаков составило $p = 45984$, что при $n = 491$ наблюдении формирует сверхвысокоразмерное признаковое пространство с соотношением $p/n \approx 94$.

Снижение размерности методом главных компонент

В условиях сверхвысокой размерности ($p \gg n$) применение классификаторов напрямую к исходным признакам приводит к проблеме переобучения [2]. Для ее решения использован метод главных компонент (Principal Component Analysis, PCA) [10].

Пусть \bar{X} — центрированная матрица наблюдений размером $n \times p$. Метод главных компонент выполняет ортогональное линейное преобразование:

$$Y = \bar{X}W, \quad (2)$$

где Y — матрица главных компонент размером $n \times p$;

W — ортогональная матрица собственных векторов ковариационной матрицы.

Собственные векторы находятся из решения задачи [10]:

$$Sw_i = \lambda_i w_i, \quad (3)$$

где $S = (1/(n-1))\bar{X}^T\bar{X}$ — выборочная ковариационная матрица;

λ_i — i -е собственное значение;

w_i — соответствующий собственный вектор.

Доля дисперсии, объясняемая i -й главной компонентой:

$$\rho_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^r \lambda_j}, \quad (4)$$

где $r = \min(n-1, p)$ — ранг матрицы данных.

Количество сохраняемых компонент d определялось из условия достижения порога кумулятивной объясненной дисперсии 95%:

$$\rho_{\text{cum}}(d) = \frac{\sum_{i=1}^d \lambda_i}{\sum_{j=1}^r \lambda_j} \geq 0,95. \quad (5)$$

Логистическая регрессия с L1-регуляризацией

Для многоклассовой классификации с $K = 7$ диагностическими классами применена логистическая регрессия со стратегией «один против всех» (One-vs-Rest, OvR) [2]. Для каждого класса k строится бинарный классификатор, оценивающий вероятность принадлежности объекта x к данному классу:

$$P(y = k | \mathbf{x}) = \sigma(\mathbf{w}_k^T \mathbf{x} + b_k), \quad (6)$$

где \mathbf{w}_k^T — вектор весов для класса k ;

b_k — смещение;

$\sigma(\cdot)$ — логистическая (сигмоидная) функция:

$$\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}. \quad (7)$$

Для предотвращения переобучения и обеспечения разреженности модели применена L1-регуляризация (Lasso). Оптимизируемая функция потерь имеет вид:

$$\mathcal{L}(\mathbf{w}) = -\sum_{i=1}^n [y_i \log(\hat{y}_i) + (1 - y_i) \log(1 - \hat{y}_i)] + C^{-1} \sum_{j=1}^d |w_j|, \quad (8)$$

где y_i — истинная метка i -го наблюдения; \hat{y}_i — предсказанная вероятность;

C — параметр регуляризации (в исследовании $C = 1,0$);

d — количество признаков (главных компонент).

L1-регуляризация обеспечивает обнуление малозначимых коэффициентов, что повышает интерпретируемость модели и снижает риск переобучения.

Итоговое предсказание класса определяется как:

$$\hat{y} = \arg \max_{k \in \{0,1,\dots,K-1\}} P(y = k | \mathbf{x}). \quad (9)$$

Методология оценки качества

Для объективной оценки обобщающей способности моделей использовалась стратифицированная 5-кратная кросс-валидация. Данные разбивались на пять непересекающихся подмножеств (фолдов) с сохранением пропорций классов в каждом подмножестве. На каждой итерации четыре фолда использовались для

обучения модели, один — для тестирования. Процедура повторялась пять раз, каждый фолд однократно выступал в роли тестового.

Важной особенностью методологии является применение PCA внутри каждого фолда кросс-валидации. Параметры преобразования (средние значения признаков, собственные векторы ковариационной матрицы) вычислялись исключительно на обучающей части фолда и затем применялись к тестовой части. Такой подход исключает утечку информации из тестовой выборки в обучающую и обеспечивает корректную оценку обобщающей способности модели.

Разбиение данных на обучающую (70%) и тестовую (30%) выборки для финальной оценки выполнялось с учетом идентификаторов сигналов, что предотвращает попадание фрагментов одного сигнала в разные выборки.

Качество классификации оценивалось с помощью макроусредненной F1-меры (F1-macro), которая вычисляется как среднее арифметическое F1-мер по всем классам. Данная метрика учитывает качество распознавания каждого класса равнозначно, что важно при несбалансированном распределении классов в выборке.

По результатам кросс-валидации вычислялись два показателя: среднее значение F1-macro по пяти фолдам, характеризующее типичную точность модели, и стандартное отклонение (Std), характеризующее стабильность результатов при различных разбиениях данных. Низкое значение стандартного отклонения свидетельствует о робастности модели и воспроизводимости результатов.

Результаты исследования

Сравнительный анализ методов классификации

Проведено сравнение семи методов машинного обучения. Результаты представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение методов классификации на тестовой выборке

Метод	Ассурасу (точность)	Взвешенная F1-мера	F1 macro	ROC AUC	Время, с
Logistic Regression	0,9932	0,9932	0,9921	0,9905	0,10
Extra Trees	0,9932	0,9931	0,9939	1,0000	0,19
SGD Classifier	0,9932	0,9932	0,9921	0,9922	0,04
Naive Bayes	0,9864	0,9863	0,9867	0,9913	0,02
KNN (k=5)	0,9864	0,9863	0,9867	0,9999	0,22
Random Forest	0,9728	0,9729	0,9743	0,9995	0,25
Hist Gradient Boosting	0,9660	0,9659	0,9649	0,9953	2,48

Три метода достигли одинаковой точности Accuracy = 0.9932: логистическая регрессия, Extra Trees и SGD Classifier.

Результаты кросс-валидации

Стратифицированная 5-кратная кросс-валидация подтвердила стабильность результатов (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Результаты стратифицированной 5-кратной кросс-валидации

Метод	F1-macro (CV)	Std
Logistic Regression	99,56 %	± 0,55 %
Extra Trees	99,31 %	± 0,64 %
Hist Gradient Boosting	99,22 %	± 0,40 %
SGD Classifier	99,02 %	± 1,07 %
Random Forest	98,93 %	± 0,88 %
Naive Bayes	98,79 %	± 1,17 %
KNN (k=5)	98,47 %	± 1,17 %

Обоснование выбора логистической регрессии

После применения PCA данные становятся практически линейно разделимыми. Логистическая регрессия оптимально использует линейную структуру редуцированного признакового пространства. L1-регуляризация обеспечивает разреженность модели, минимизируя риск переобучения. Низкая дисперсия результатов кросс-валидации критически важна для практического применения и воспроизводимости.

Логистическая регрессия выбрана как оптимальный метод по совокупности критериев. Она демонстрирует максимальное среднее значение F1-macro (99,56%) и минимальную дисперсию ($\pm 0,55\%$), что свидетельствует о высокой стабильности и воспроизводимости результатов.

Визуализация результатов

Проекция данных на плоскость первых двух главных компонент (рис. 1) демонстрирует структуру разделения диагностических классов.

На рис. 1 видно четкое пространственное разделение класса 0 (исправное состояние) от всех классов неисправностей. Классы неисправностей образуют характерную структуру: классы 1–2 группируются в области отрицательных значений PC1, классы 3–6 располагаются в области положительных значений. Такое распределение может отражать конструктивные особенности шестицилиндрового дизельного двигателя Д50.

Матрица ошибок классификации (рис. 2) показывает распределение предсказаний по классам.

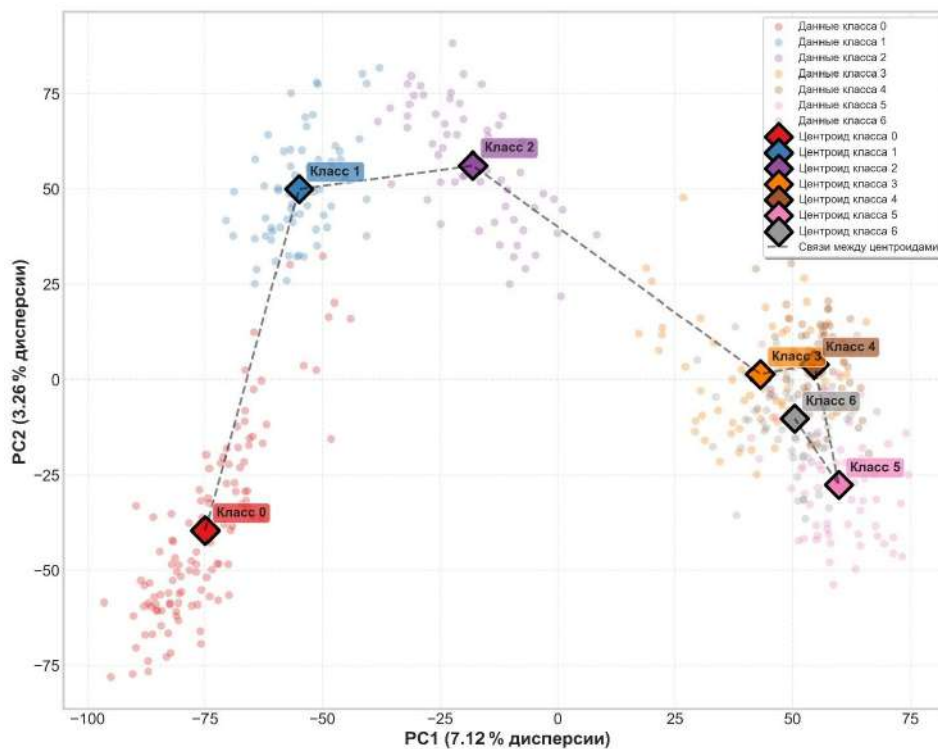


Рис. 1. Проекция данных на плоскость первых двух главных компонент с центроидами классов

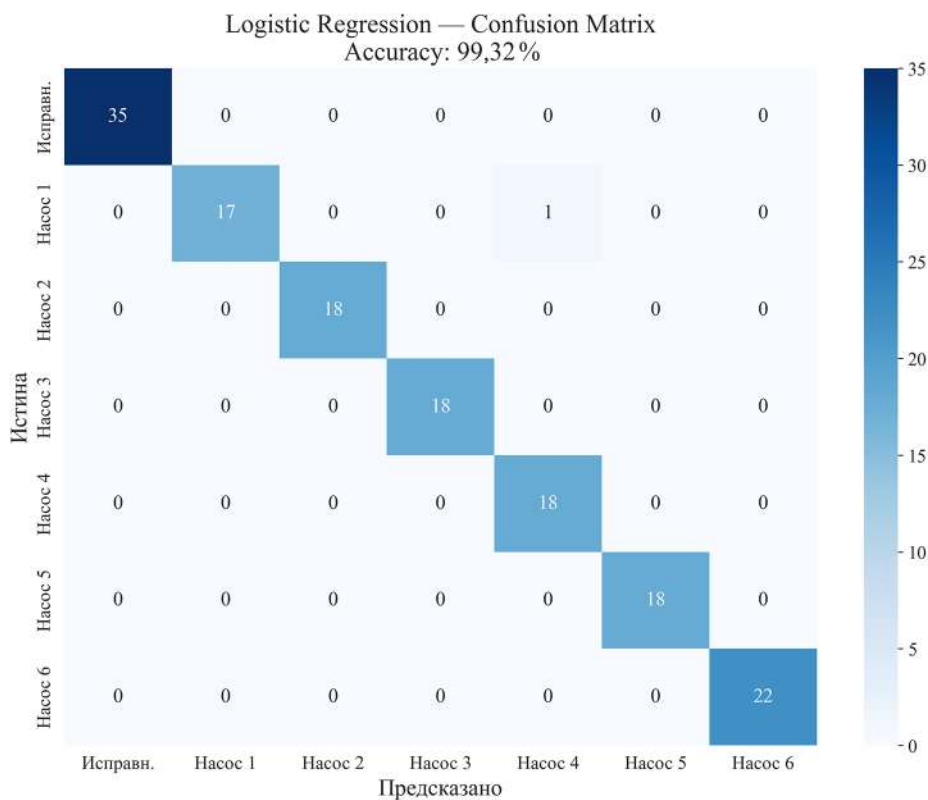


Рис. 2. Матрица ошибок классификации методом логистической регрессии (Accuracy = 99,32%)

Анализ матрицы ошибок выявил единственную ошибку классификации: один образец класса «Насос 1» (отключение 1-го цилиндра) был ошибочно классифицирован как «Насос 4» (отключение 4-го цилиндра).

ROC-кривые для всех исследованных методов представлены на рис. 3.

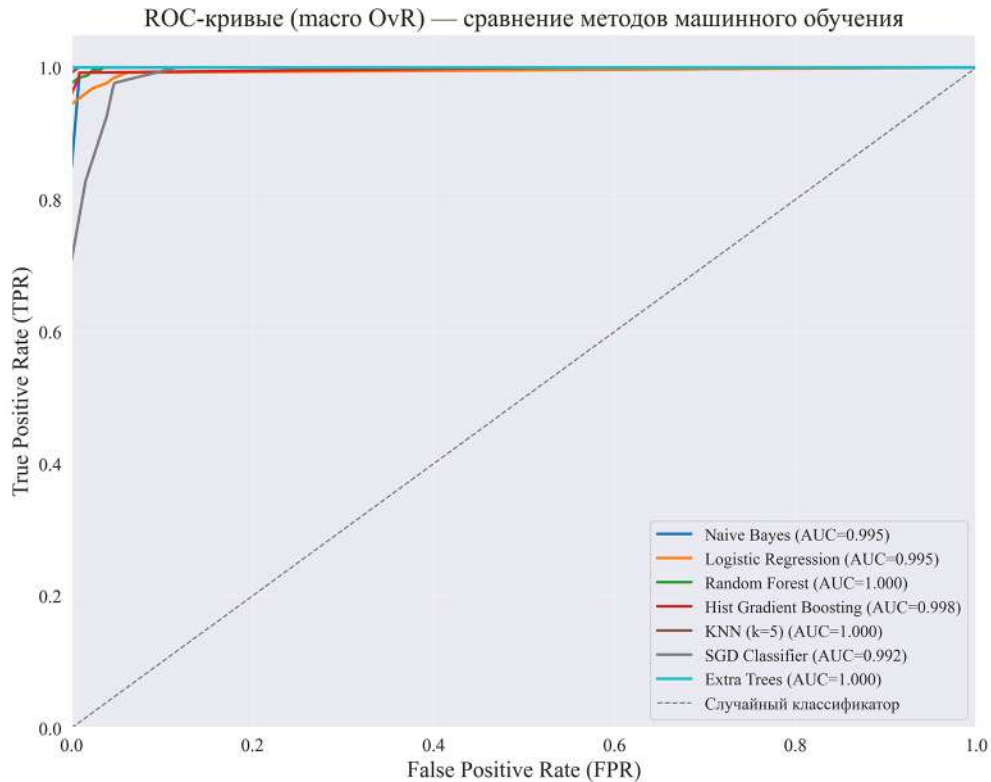


Рис. 3. ROC-кривые (масштаб OvR) для сравнительного анализа методов машинного обучения

Все методы демонстрируют высокие значения площади под ROC-кривой ($AUC > 0.99$), что свидетельствует об отличной разделимости классов в редуцированном признаковом пространстве после PCA.

Обсуждение и заключение

Проведенное исследование экспериментально подтвердило возможность автоматической классификации технического состояния дизельного двигателя Д50 по диагностическим классам на основе вейвлет-признаков вибросигналов.

Метод главных компонент с порогом 95 % объясненной дисперсии позволил эффективно снизить размерность признакового пространства с 45984 до нескольких сотен компонент, устранив мультиколлинеарность и создав оптимальные условия для работы линейных классификаторов.

Логистическая регрессия с L1-регуляризацией достигла точности классификации 99,32 % на тестовой выборке. Стратифицированная кросс-валидация

подтвердила стабильность результатов: $F1\text{-macro} = 99,56\% \pm 0,55\%$. Выбор логистической регрессии обоснован сочетанием максимальной точности, минимальной дисперсии результатов и высокой интерпретируемости модели.

Практическая значимость работы заключается в экспериментальной апробации полного цикла классификации: от извлечения вейвлет-признаков до сравнительного анализа методов машинного обучения с честной оценкой обобщающей способности. Достигнутые результаты создают основу для разработки систем диагностики реального времени.

Ограничения исследования включают проведение экспериментов в контролируемых лабораторных условиях с имитацией неисправностей. Для практического применения требуется валидация на реальных эксплуатационных дефектах.

Перспективы дальнейших исследований включают: расширение набора диагностических классов; валидацию в эксплуатационных условиях; разработку алгоритмов для встраиваемых систем реального времени; исследование применимости глубокого обучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20 (7). Pp. 1483–1510.
2. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: a review / Y. Lei [et al.] // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 138.
3. Randall R. B. *Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications*, R. B. Randall. 2nd ed. // Chichester: John Wiley & Sons, 2021, 456 p.
4. Зигельман Е. Б., Лоцинин И. А., Скворцов Д. Ф. Исследование возможности вибродиагностики среднеоборотных дизель-генераторов // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2013. № 6. С. 42–48.
5. Mallat S. *A wavelet tour of signal processing*. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2009. 832 p.
6. Yan R., Gao R. X., Chen X. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: a review with applications // *Signal Processing*. 2014. Vol. 96. Pp. 1–15.
7. Fault diagnosis of diesel engine valve clearance based on wavelet packet decomposition and neural networks / Y. Liu [et al.] // *Electronics*. 2023. Vol. 12 (2). P. 353.
8. Диагностирование газоздушного тракта тепловозного дизеля с использованием интеллектуального классификатора / В. В. Грачев [и др.] // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2022. Вып. 2. С. 124–140.
9. Breiman L. Random forests // *Machine Learning*. 2001. Vol. 45 (1). Pp. 5–32.
10. Jolliffe I. T., Cadima J. Principal component analysis: a review and recent developments // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2016. Vol. 374 (2065). — 20150202.

Дата поступления: 09.01.2026

Решение о публикации: 11.02.2026

Контактная информация:

БЕЛЯЕВ Андрей Александрович — старший преподаватель; belyaevaa@list.ru

Multiple-Class Classification of a Diesel Locomotive Engine's Mechanical Condition Based on Wavelet Properties of Vibration Signals via Machine-Learning Techniques

A. A. Beliaev

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Beliaev A. A. Multiple-Class Classification of a Diesel Locomotive Engine's Mechanical Condition Based on Wavelet Properties of Vibration Signals via Machine-Learning Techniques // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 1. pp. 142–153. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-142-153. (In Russian)*

Abstract

Objective: to develop and experimentally validate a multiclass classification algorithm for assessing the technical condition of a diesel locomotive engine based on wavelet properties derived from vibration signals, employing machine learning methods to ensure the reliability and safety of railway transport. **Methods:** experimental measurements were performed on a D50 diesel engine at the Diesel Locomotive Laboratory named after Professor Ya. M. Gakkel, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. A total of 491 triaxial vibration recordings were obtained across seven diagnostic states (one of which represented normal operation and six of which simulated fuel supply faults by cutting off fuel delivery to specific cylinders). Wavelet packet decomposition to the eleventh level, using a fourth-order Daubechies wavelet, yielded 45,984 diagnostic features from the decomposition nodes. Principal Component Analysis (PCA) was employed to minimize the dimensionality of the extracted features, retaining components that together explained 95 % of the variation. Stratified 5-fold cross-validation was used to compare eight machine-learning algorithms in order to ensure an unbiased evaluation of the models' generalization capabilities. **Results:** the highest classification performance of 99.32 % was obtained using logistic regression with L1 regularization (Accuracy = 0.9932, F1-macro = 0.9921). The stratified cross-validation confirmed the stability and reproducibility of this outcome, yielding an F1-macro score of 99.56 % \pm 0.55 %. This method demonstrated the lowest variability across all tested algorithms, indicating strong robustness to data variability. **Practical significance:** the experimental findings have confirmed the feasibility of automatic classification of diesel engines into diagnostic categories based on wavelet properties of vibration signals. Logistic regression has been selected as the optimal method because it provides a favorable balance of predictive accuracy, stability of results, and model interpretability. The developed algorithm can serve as a foundation for real-time on-board diagnostic systems for diesel locomotives.

Keywords: machine learning, classification, logistic regression, L1 regularization, wavelet analysis, vibration diagnostics, diesel engine, locomotive, principal component analysis, cross-validation

References

1. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, vol. 20 (7). Pp. 1483–1510.
2. Y. Lei [et al.]. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: a review // *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, vol. 138.
3. Randall R. B. *Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications*, R. B. Randall. 2nd ed. // Chichester: John Wiley & Sons, 2021, 456 p.
4. Zigel'man E. B., Loshchinin I. A., Skvortsov D. F. Issledovanie vozmozhnosti vibrodiagnostiki sredneoborotnykh dizel'-generatorov // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie*. 2013. № 6. S. 42–48. (In Russian)
5. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2009, 832 p.
6. Yan R., Gao R. X., Chen X. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: a review with applications, *Signal Processing*, 2014, vol. 96. Pp. 1–15.
7. Y. Liu [et al.]. Fault diagnosis of diesel engine valve clearance based on wavelet packet decomposition and neural networks, *Electronics*, 2023, vol. 12 (2). P. 353.
8. Diagnostirovanie gazovozdushnogo trakta teplovoznogo dizelya s ispol'zovaniem intellektual'nogo klassifikatora / V. V. Grachev [i dr.] // *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij*. 2022. Vyp. 2. S. 124–140. (In Russian)
9. Breiman L. Random forests // *Machine Learning*, 2001, vol. 45 (1). Pp. 5–32.
10. Jolliffe I. T., Cadima J. Principal component analysis: a review and recent developments, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2016, vol. 374 (2065). 20150202.

Received: 09.01.2026

Accepted: 11.02.2026

Author's information:

Andrei A. BELIAEV — Senior Lecturer; belyaevaa@list.ru

УДК 629.4.014

Способ определения основного сопротивления движению грузового вагона при проведении ходовых тормозных испытаний

Ю. П. Бороненко, А. А. Комайданов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Бороненко Ю. П., Комайданов А. А. Способ определения основного сопротивления движению грузового вагона при проведении ходовых тормозных испытаний // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 154–173. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-154-173

Аннотация

Цель: разработка усовершенствованного метода определения основного сопротивления движению грузового вагона при проведении ходовых тормозных испытаний, позволяющего повысить точность измерений и снизить затраты на проведение испытаний. **Методы:** основное сопротивление движению одиночного вагона определяется экспериментально, а аэродинамическая составляющая одиночного вагона и в составе поезда рассчитывается на цифровых моделях. **Результаты:** разработана и апробирована методика испытаний по определению основного сопротивления движению грузового вагона при проведении ходовых тормозных испытаний, которая позволяет существенно сократить расходы на них. **Практическая значимость:** возможность существенного снижения затрат на определение сопротивления движению, повышение точности измерений за счет исключения ряда погрешностей. Разработанный метод можно использовать при приемочных испытаниях новых вагонов и получать уточненные значения по основному сопротивлению движению для оценки их энергетической эффективности.

Ключевые слова: грузовой вагон, сопротивление движению, энергетическая эффективность вагона, ходовые тормозные испытания

Введение

Железнодорожный транспорт является одним из крупнейших потребителей топливно-энергетических ресурсов в стране. В структуре затрат ОАО «РЖД» доля топливно-энергетических ресурсов, расходуемых на тягу поездов, превышает 60% [1]. Энергетическая эффективность является важным фактором повышения конкурентоспособности железных дорог на рынке транспортных услуг.

Основные документы в области энергосбережения [2, 3] указывают в качестве одного из важнейших направлений снижения энергопотребления совершенствование системы анализа, планирования и нормирования расходов топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов, в том числе с применением новых информационных технологий [4, 5]. Расход топливно-энергетических ресурсов зависит не только от тягово-энергетических характеристик локомотивов, но и от технико-экономических характеристик, а также от сопротивления движению находящихся в поезде вагонов [6–8]. Поэтому для учета и оценки электроэнергии

или дизельного топлива, затраченных на ведение поездов, необходимо знать сопротивление вагонов в поезде.

В настоящее время для оценки основного сопротивления движению подвижного состава применяются три основных подхода: экспериментальные методы [9]; компьютерное моделирование с использованием цифровых моделей подвижного состава [10] и физическое моделирование, основанное на продувке моделей железнодорожных экипажей в аэродинамической трубе [11].

Несмотря на разнообразие методов, результаты обычно представляются в виде квадратного трехчлена (формула Дэвиса):

$$w = A + Bv + Cv^2, \quad (1)$$

где w — основное сопротивление движению;

v — скорость движения вагона, м/с;

A, B, C — коэффициенты, зависящие от нагрузки на ось, типа подвижного состава и конструкции ходовых частей.

Компьютерное и физическое моделирование позволяет достаточно точно вычислить аэродинамическое сопротивление, но точность измерения механического сопротивления недостаточна.

В свою очередь, экспериментальные методы определения основного сопротивления движению подразделяются на три основных подхода:

1. Динамометрический метод определения основного сопротивления движению основан на включении между локомотивом и составом однородных вагонов (в количестве не менее 65 шт.) динамометрического вагона для регистрации силы тяги, после чего рассчитывается основное сопротивление движению одного вагона. Данный метод отличается высокой стоимостью, а именно необходимостью исключения из эксплуатации порядка 65 вагонов и проведения погрузочно-разгрузочных работ.

2. Метод скатывания основан на измерении величины замедления единицы подвижного состава с известной начальной скорости. По полученному замедлению вычисляется основное сопротивление движению исследуемой подвижной единицы. Однако применение данного метода к грузовым вагонам затруднено из-за различной аэродинамической составляющей отдельной единицы подвижного состава и в поезде в процессе движения.

3. Метод энергетического баланса — способ экспериментального определения основного сопротивления, суть которого заключается в измерении затрат энергии на передвижение вагона и вычитании из них прочих энергетических потерь. Основным недостатком данного метода является широкая область среднеквадратического отклонения из-за метода подсчета [12].

В работах [13, 14] предложен расчетно-экспериментальный метод, объединяющий компьютерное моделирование и эксперимент. Механическая составляющая

сопротивления движению определяется классическим методом скатывания, в то время как аэродинамическая рассчитывается посредством цифровых моделей. Основным достоинством этого метода является существенное снижение затрат на определение основного сопротивления движению грузовых вагонов, так как в испытаниях участвует одна единица подвижного состава вместо 65 единиц одной модели.

Однако и в этом способе имеются недостатки:

- высокая степень рассеивания экспериментальных данных, связанная с дифференцированием при определении ускорения, из-за чего возникает необходимость применения фильтра Калмана 2-го порядка (фрагмент экспериментальных данных и их фильтрация алгоритмом Калмана 2-го порядка представлены на рис. 1);

- при определении ускорения исследуемого вагона используется среднее значение уклона по длине участка, а не его мгновенное значение, из-за чего возникает дополнительное рассеивание экспериментальных данных (рис. 2);

- анализируется весь процесс замедления, не позволяющий вычислить ускорение исследуемого вагона в аналитической форме.

В связи с этим предлагается повысить точность измерения основного сопротивления движению, исключив дифференцирование при определении ускорения исследуемого вагона с учетом мгновенного значения уклона пути и его сопоставления с данными о положении вагона, полученными при посекундной регистрации, а также с применением более точного GNSS-приемника.

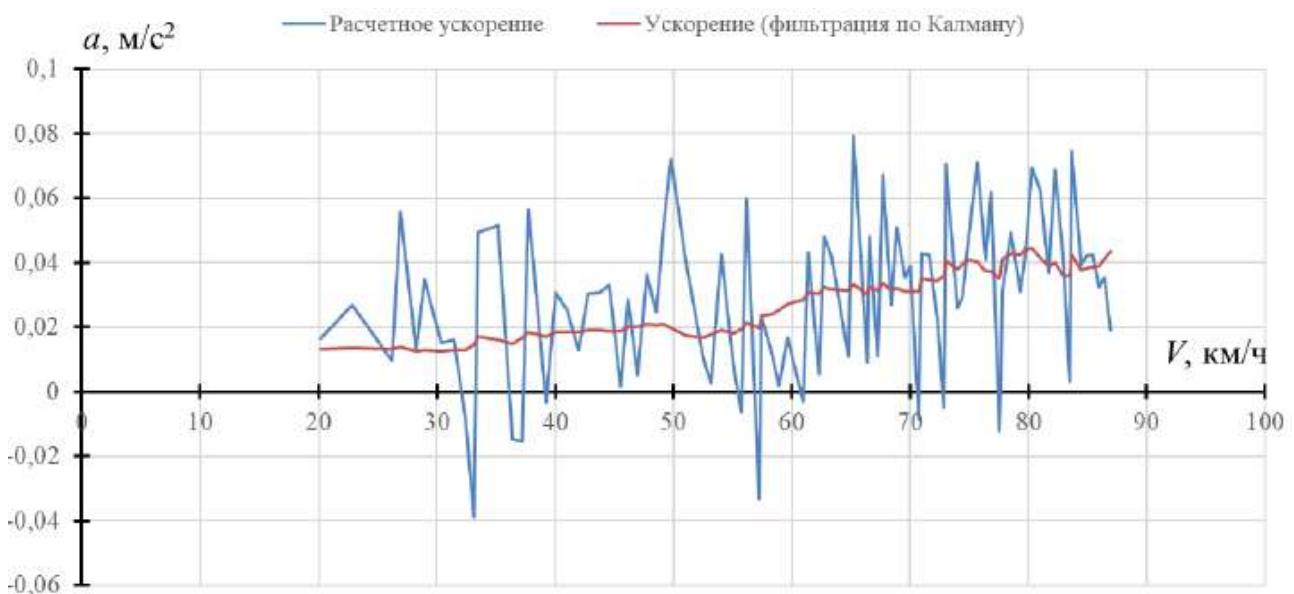


Рис. 1. Экспериментальная запись ускорения и ее вид после фильтрации алгоритмом Калмана 2-го порядка [14]

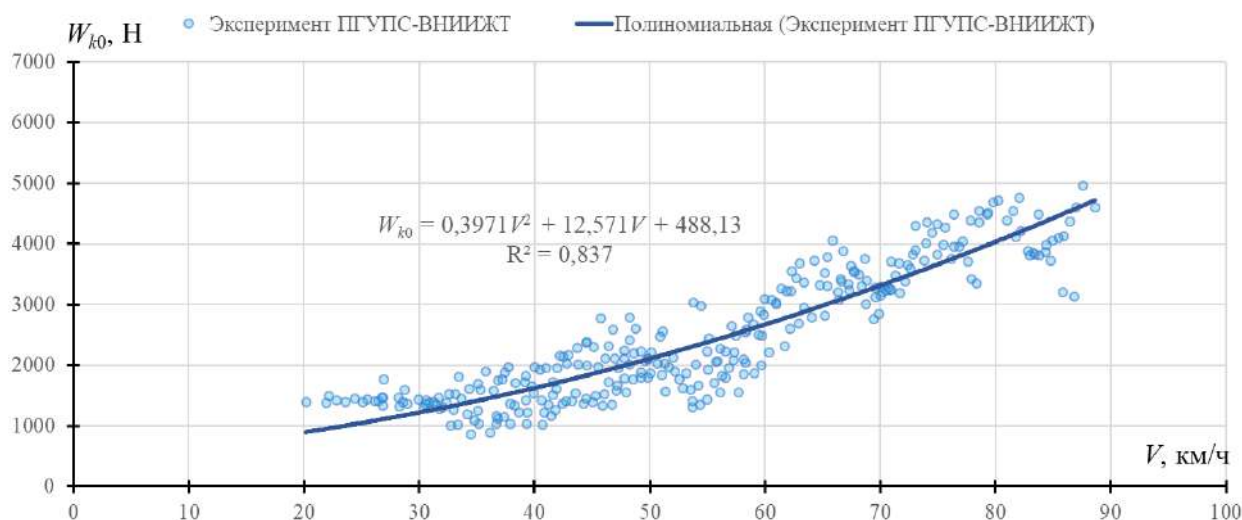


Рис. 2. Зависимость полного основного сопротивления движению вагона от скорости его движения, полученная при помощи фильтрации экспериментальных данных [14]

Кроме того, предлагается вариант испытаний, который совместно с проведением ходовых тормозных испытаний обеспечит снижение стоимости и трудоемкости. В соответствии с данной методикой основное удельное сопротивление движению грузового вагона будет определяться на испытательном полигоне совместно с проведением ходовых тормозных испытаний, которые обязательны для каждого нового вагона при его постановке на производство.

Теоретическое обоснование уточненного способа определения основного сопротивления движению при проведении ходовых тормозных испытаний

Уравнение движения одиночного четырехосного вагона в режиме выбега имеет вид:

$$\left(m + \frac{4J}{r^2} \right) \frac{dv}{dt} = mg \frac{dz}{dx} - W_{k0}, \quad (2)$$

где m — масса вагона;

g — ускорение свободного падения;

J — момент инерции колесных пар вагона;

r — радиус колеса колесной пары вагона;

t — время;

v — скорость движения вагона;

z, x — вертикальная и продольная координаты вагона во время движения соответственно;

W_{k0} — основное сопротивление движению одиночного вагона;

$w_{k0} = \frac{W_{k0}}{m}$ — удельное основное сопротивление движению одиночного вагона.

При введении коэффициента инертности вращающихся масс γ :

$$\gamma = \frac{4J}{mr^2}, \quad (3)$$

уравнение (2) примет вид:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{1+\gamma} (gi(x) - w_{k0}), \quad (4)$$

где $i(x) = \frac{dz}{dx}$ — уклон пути.

Величина уклона пути считается заранее известной на всей протяженности испытательного участка за счет нивелировки пути. Значение $i(x)$ принимают со знаком «минус» при подъемах и со знаком «плюс» при спусках.

Так как опытные броски проводились вверх по уклону, из выражения (4) получим:

$$w_{k0} = -g \frac{dz}{dx} - (1+\gamma) \frac{dv}{dt}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что сопротивление движению одиночного вагона можно определить, зная уклон пути и дифференцируя скорость движения одиночного вагона.

В свою очередь, навигационный приемник при определении скорости также проводит дифференцирование пройденного пути. Повторное дифференцирование вносит существенные ошибки в вычисление ускорения (замедления) вагона. Поэтому в диапазоне снижения скорости на 10 км/ч движение предлагается считать равнозамедленным, записав следующие выражения для определения ускорения через начальную v_{0k} и конечную v_k скорости, координаты положения вагона и время движения вагона на определенном участке железнодорожного пути:

$$w_{k0ij} = -g \frac{dz}{dx} - (1+\gamma) \left(\frac{v_{kij} - v_{0kij}}{\Delta t_{ij}} \right), \quad (6)$$

$$w_{k0ij} = -g \frac{dz}{dx} - (1+\gamma) \left(\frac{v_{0kij}^2 + v_{kij}^2}{2(x_{kij} - x_{0kij})} \right), \quad (7)$$

$$w_{k0ij} = -g \frac{dz}{dx} - (1+\gamma) \left(\frac{2(x_{kij} - x_{0kij})}{(\Delta t_{ij})^2} + \frac{2v_{0kij}}{\Delta t_{ij}} \right), \quad (8)$$

где v_{0kij} , v_{kij} — начальная и конечная скорости движения исследуемого вагона на измерительном участке, м/с;

Δt_{ij} — время пробега вагона на исследуемом участке, с;

x_{0kij}, x_{kij} — положение исследуемого вагона в момент начала и конца измерительного участка соответственно, м;

i — номер испытания со средней скоростью v_{cpkij} ($i = 1 \dots m$);

j — номер броска со средней скоростью v_{cpkij} ($j = 1 \dots n$).

Для каждого броска вычисляется средняя скорость движения v_{cpk} исследуемого вагона в режиме выбега для участка, на котором измеряется основное удельное сопротивление движению вагона:

$$v_{cpkij} = \frac{v_{0kij} + v_{kij}}{2}. \quad (9)$$

Выбор окончательной формулы для определения ускорения предлагается произвести по результатам экспериментов.

После определения удельного основного сопротивления движению одиночного исследуемого вагона w_{k0ij} для каждой из скоростей v_{cpkij} в порожнем и груженом режиме исследуемого вагона методом наименьших квадратов строятся кривые зависимости $w_{k0ij} = f(v_{cpkij})$ с целью определения удельного основного сопротивления движению исследуемого вагона в диапазоне его скоростей движения:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[w_{k0ij} - (A + Bv_{cpkij} + Cv_{cpkij}^2) \right]^2 = \min. \quad (10)$$

Аэродинамическая составляющая основного сопротивления движению в данной работе определяется по апробированной методике [10].

В результате расчета определяются величины аэродинамического сопротивления для отдельных элементов конструкции исследуемого вагона: лобовое сопротивление вагона $w_{\text{лоб}}$, сопротивление ходовых частей вагона $w_{\text{хч}}$, сопротивление межвагонного пространства $w_{\text{мв}}$, сопротивление внутренних частей кузова $w_{\text{вн}}$, сопротивление боковых стен $w_{\text{бс}}$, сопротивление подвагонного оборудования $w_{\text{подв}}$, хвостовое сопротивление вагона $w_{\text{хв}}$ (или хвостовое сопротивление последнего вагона при расчете основного сопротивления движению вагона в составе поезда).

Полное аэродинамическое сопротивление одиночного исследуемого вагона $w_{\text{аэр.0}}$ и вагона в составе поезда $w_{\text{аэр.н}}$ определяются по выражениям (11) и (12) соответственно [13]:

$$w_{\text{аэр.0}} = w_{\text{лоб}} + w_{\text{бс}} + w_{\text{вн}} + w_{\text{подв}} + w_{\text{хч}} + w_{\text{хв}}, \quad (11)$$

$$w_{\text{аэр.н}} = \frac{(\sum w_{\text{мв}} + \sum w_{\text{бс}} + \sum w_{\text{вн}} + \sum w_{\text{подв}} + \sum w_{\text{хч}})}{n} + w_{\text{хв}}. \quad (12)$$

Основное сопротивление движению одиночного вагона w_{k0} является суммой механического $w_{\text{мех.0}}$ и аэродинамического $w_{\text{аэр.0}}$ сопротивлений:

$$w_{0k} = w_{\text{мех.0}} + w_{\text{аэр.0}} \quad (13)$$

Из формулы (13) находим механическое сопротивление одиночного вагона $w_{\text{мех.0}}$ как разницу сопротивления движению w_{k0} , определенного экспериментально, и аэродинамического сопротивления одиночного вагона $w_{\text{аэр.0}}$, которое определяется на цифровых моделях:

$$w_{\text{мех.0}} = w_{0k} - w_{\text{аэр.0}} \quad (14)$$

После определения аэродинамического сопротивления одиночного вагона $w_{\text{аэр.0}}$ становится необходимым определить аэродинамическое сопротивление этого же вагона, но уже не одиночного, а в составе поезда $w_{\text{аэр.п}}$. Для этого вновь вычисляется аэродинамическое сопротивление исследуемого вагона в составе поезда $w_{\text{аэр.п}}$.

Основное сопротивление движению вагона в составе поезда, которое и применяется при проведении тяговых расчетов, определяется как сумма механического и аэродинамического сопротивления вагона в составе поезда $w_{\text{аэр.п}}$ минус аэродинамическое сопротивление одиночного вагона $w_{\text{аэр.0}}$:

$$w_k = w_{0k} - w_{\text{аэр.0}} + w_{\text{аэр.п}} \quad (15)$$

Методика и оборудование для экспериментального определения основного сопротивления движению

Перед началом испытаний формировался опытный поезд, состоящий из локомотива, вагона-лаборатории и исследуемого вагона, как показано на рис. 3.



Рис. 3. Схема формирования опытного поезда и продольный профиль пути

На исследуемом вагоне производятся монтаж и проверка оборудования: прибора включения тормоза, при помощи которого тормоза исследуемого вагона не приходят в действие в момент расцепки с вагоном-лабораторией, а срабатывают

в нужный момент при помощи пульта дистанционного управления; навигационного GNSS-приемника Geobox ForaOne Plus, подключенного при помощи Bluetooth-соединения к контроллеру для дистанционной передачи данных. Общий вид GNSS-приемника представлен на рис. 4, а его технические характеристики — в табл. 1.



Рис. 4. Общий вид GNSS-приемника ForaOne Plus

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики GNSS-приемника ForaOne Plus

Характеристика	Значение
Количество каналов	1408
Принимаемые сигналы	Unicore UM980: GPS L1C/A, L1C, L2C, L2P(Y), L5, BDS B1I, B2I, B3I, B1C, B2a, B2b, GLONASS G1, G2, G3, Galileo E1, E5a, E5b, E6, QZSS L1C/A, L1C, L2C, L5, L6, NavIC L5, SBAS L1C/A
Частота позиционирования	До 25 Гц
Точность позиционирования (СКО)	Статика: план 2,5 мм + 0,5 мм/км; высота 5 мм + 0,5 мм/км RTK фикс, PPK: план 8 мм + 1 мм/км; высота 15 мм + 1 мм/км DGNSS: план 0,25 м + 1 мм/км; высота 0,5 м + 1 мм/км
Рабочая температура	-45 ... +80 °C

Точность позиционирования исследуемого вагона вдоль пути данного приемника удовлетворительна ($\pm 0,25$ м), однако по высоте точность недостаточна ($\pm 0,50$ м), поэтому используется геодезическая съемка пути испытательного участка.

Опытные поездки проводятся со следующими скоростями расцепа исследуемого вагона от вагона-лаборатории: 30, 50, 70, 90, 100, 110, 120, 130 км/ч (со скоростями торможения 20, 40, 60, 80, 90, 100, 110, 120 км/ч соответственно).

Опытный сцеп разгоняется до скорости движения, близкой к скорости расцепа (от 30 до 130 км/ч). После достижения скорости, превышающей испытательное

значение на величину погрешности (не более 5 % от испытательной скорости), по команде руководителя испытаний производится расцеп вагона-лаборатории и исследуемого вагона при помощи расцепного устройства.

После расцепа исследуемого вагона с вагоном-лабораторией проводится запись пройденного исследуемым вагоном пути и скорости его движения. В момент снижения скорости движения исследуемого вагона на 10 км/ч (независимо от начальной опытной скорости) на прибор включения тормоза подается сигнал на приведение тормоза в действие, при этом продолжается непрерывная регистрация пройденного пути и скорости движения исследуемого вагона до его полной остановки.

По измеренной скорости движения исследуемого вагона и его пройденному пути до начала торможения (расстояние, которое проходит вагон в режиме выбега, начиная с момента расцепа и заканчивая моментом снижения испытательной скорости на 10 км/ч и приведением тормоза вагона в действие) производится определение основного сопротивления движению одиночного испытуемого вагона. Тормозной путь исследуемого вагона определяется с момента приведения тормоза вагона в действие до его полной остановки традиционным методом.

Испытания по определению основного сопротивления движению одиночного вагона

Для проведения испытаний был сформирован опытный сцеп, представленный на рис. 5. Испытания проводились в порожнем (с массой тары 29,05 т) и в груженом (с массой брутто 93,05 т) состояниях. Для каждой опытной скорости выполнялось по три поездки.



Рис. 5. Опытный сцеп (фото А. А. Комайданова)

Для каждого из 48 бросков со скоростями расцепа исследуемого вагона и вагона-лаборатории от 30 до 130 км/ч в груженом и порожнем состояниях исследуемого вагона были построены графики, как показано на рис. 6.

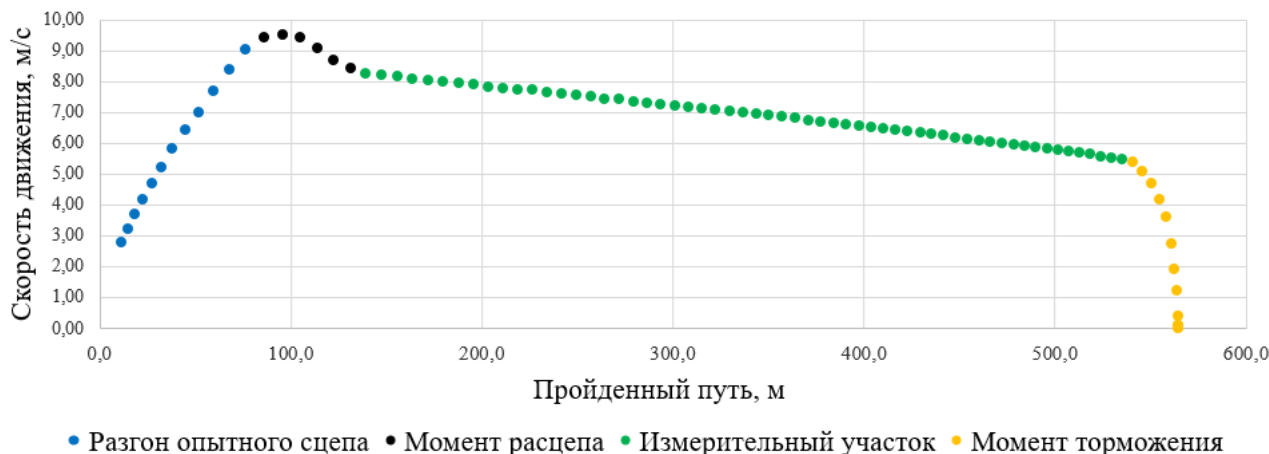


Рис. 6. График зависимости скорости движения исследуемого вагона от пройденного пути в порожнем состоянии при скорости расцепа 30 км/ч

При обработке данных был применен дифференцированный подход, основанный на посекундной регистрации положения исследуемого вагона и сопоставлении полученных данных с мгновенной величиной уклона пути.

Сопrotивление движению одиночного исследуемого вагона определялось по формуле (6). Обработка данных показала, что формулы (7) и (8) дают большее среднеквадратичное отклонение. Поэтому в дальнейшем использовалась формула (6).

Результаты расчета основного сопротивления движению одиночного исследуемого вагона, определенного по формуле (6) по трем броскам для каждой опытной скорости в груженом и порожнем состояниях, представлены в табл. 2.

В результате статистического анализа экспериментальных данных установлено, что значения среднеквадратичного отклонения (СКО) для основного сопротивления движению одиночного исследуемого вагона $\sqrt{D(w_{k0cp})}$ говорят о незначительном разбросе полученных значений относительно средних, что позволяет выполнить процедуру статистического усреднения экспериментальных данных.

Графики зависимости ускорения и основного сопротивления движению одиночного исследуемого вагона от скорости его движения представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета основного сопротивления движению одиночного исследуемого вагона в режиме выбега

Порожный режим								
w_{k0} , кН	Средняя скорость движения вагона в режиме выбега, км/ч							
	27,8	44,9	64,4	84,8	94,8	104,6	113,9	124,3
Бросок 1	0,53	1,36	2,37	4,00	5,01	5,86	6,87	7,90
Бросок 2	0,54	1,37	2,43	4,00	5,00	6,00	6,91	7,85
Бросок 3	0,57	1,34	2,47	3,99	5,02	6,03	6,75	7,81
w_{k0cp}	0,55	1,36	2,42	4,00	5,01	5,96	6,85	7,85
$\sqrt{D(w_{k0cp})}$	0,017	0,013	0,040	0,005	0,006	0,072	0,066	0,034
Груженный режим								
w_{k0} , кН	Средняя скорость движения вагона в режиме выбега, км/ч							
	24,7	44,2	64,5	85,0	94,7	105,0	114,8	125,0
Бросок 1	0,87	1,50	2,57	3,54	4,81	5,64	6,70	8,25
Бросок 2	0,80	1,54	2,61	3,49	4,75	5,53	6,85	8,05
Бросок 3	0,82	1,65	2,69	3,44	4,78	5,49	6,81	8,11
w_{k0cp}	0,83	1,56	2,62	3,49	4,78	5,55	6,79	8,14
$\sqrt{D(w_{k0cp})}$	0,032	0,062	0,050	0,040	0,025	0,061	0,062	0,084

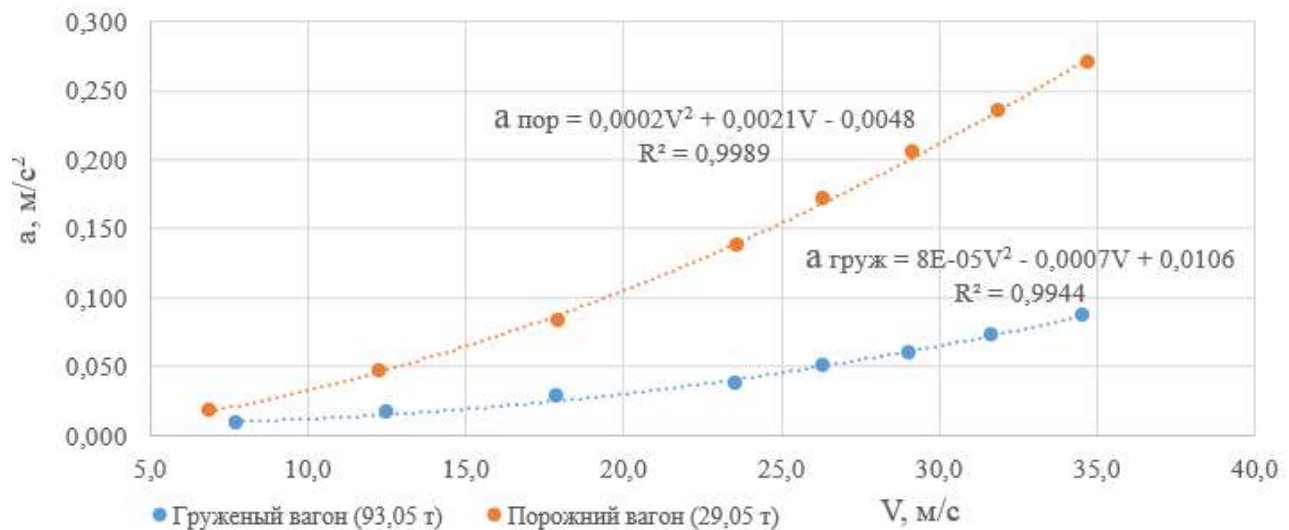


Рис. 7. Графики зависимости ускорения одиночного исследуемого вагона в режиме выбега от скорости его движения в груженом и порожнем состояниях

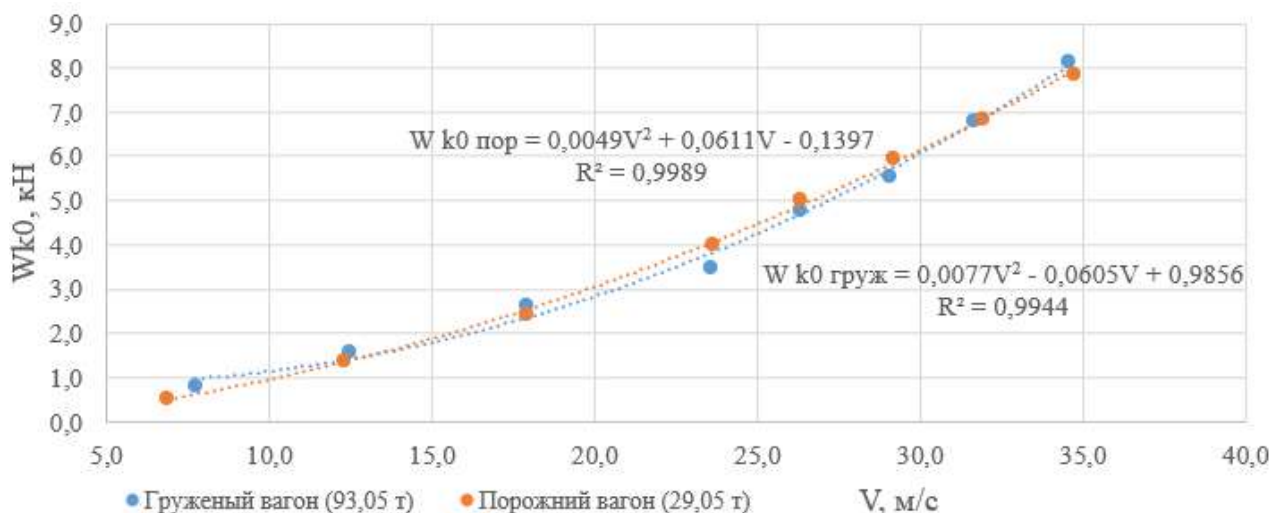


Рис. 8. Графики зависимости основного сопротивления движению одиночного исследуемого вагона в режиме выбега от скорости его движения в груженом и порожнем состояниях

Коэффициент детерминации, близкий к единице ($R^2 = 0,9944$ для груженого вагона и $R^2 = 0,9989$ для порожнего), подтверждает высокую степень соответствия между аппроксимирующей кривой и экспериментальными данными по основному сопротивлению движению одиночного исследуемого вагона.

Определение аэродинамической составляющей сопротивления движению одиночного вагона и в составе поезда

Аэродинамическая составляющая основного сопротивления движению одиночного вагона и вагона в составе поезда определялась на цифровых моделях в программном комплексе SolidWorks (рис. 9) аналогично работе [10].

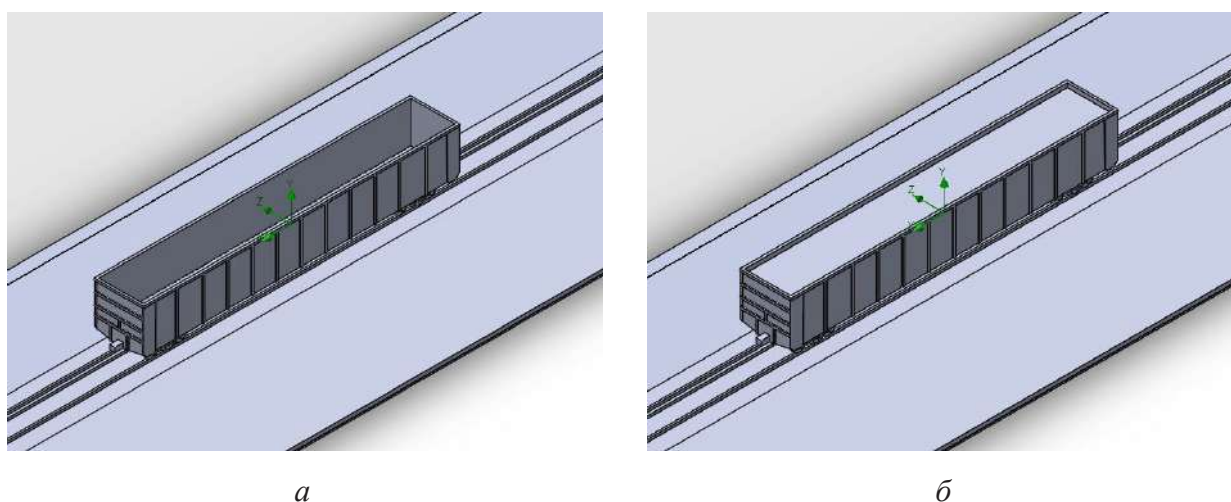


Рис. 9. Цифровые модели одиночного исследуемого полувагона: *а* — цифровая модель одиночного вагона в порожнем состоянии; *б* — цифровая модель одиночного вагона в груженом состоянии

Результаты вычисления аэродинамической составляющей основного сопротивления движению выполнялись итерационно в скоростном диапазоне вагона и поезда от 10 до 130 км/ч с шагом дискретизации 10 км/ч (рис. 10).

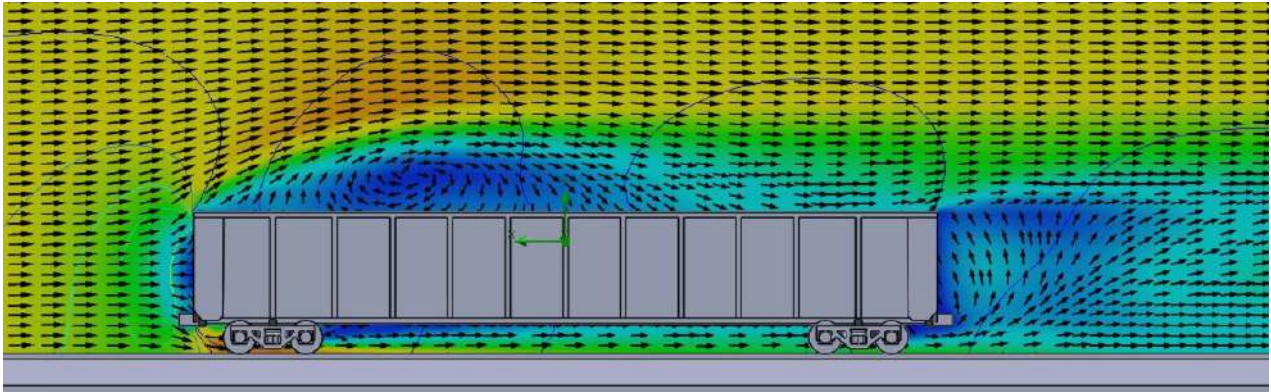


Рис. 10. Результаты расчета аэродинамической составляющей основного сопротивления движению порожнего одиночного исследуемого вагона при скорости движения 130 км/ч

Затем по формулам (11) и (12) было определено полное аэродинамическое сопротивление одиночного исследуемого вагона $w_{\text{аэр.0}}$ и вагона в составе поезда $w_{\text{аэр.л}}$.

Графики зависимости полного аэродинамического сопротивления одиночного исследуемого вагона и в составе поезда от скорости его движения представлены на рис. 11 и 12 соответственно.

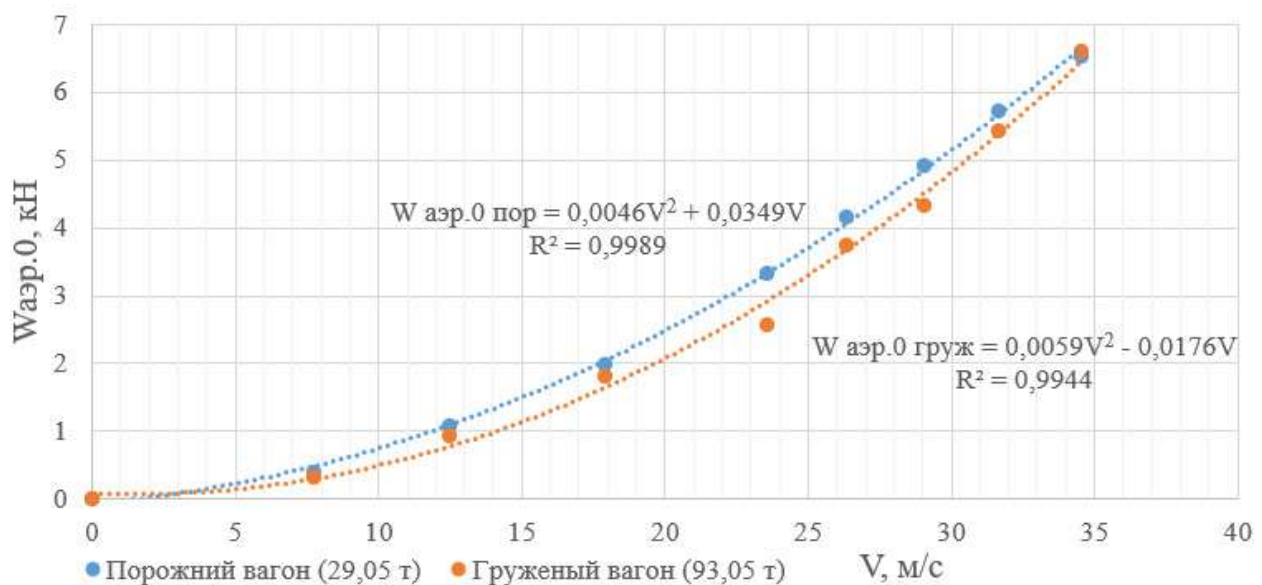


Рис. 11. Графики зависимости полного аэродинамического сопротивления одиночного исследуемого вагона от скорости его движения в груженом и порожнем состояниях

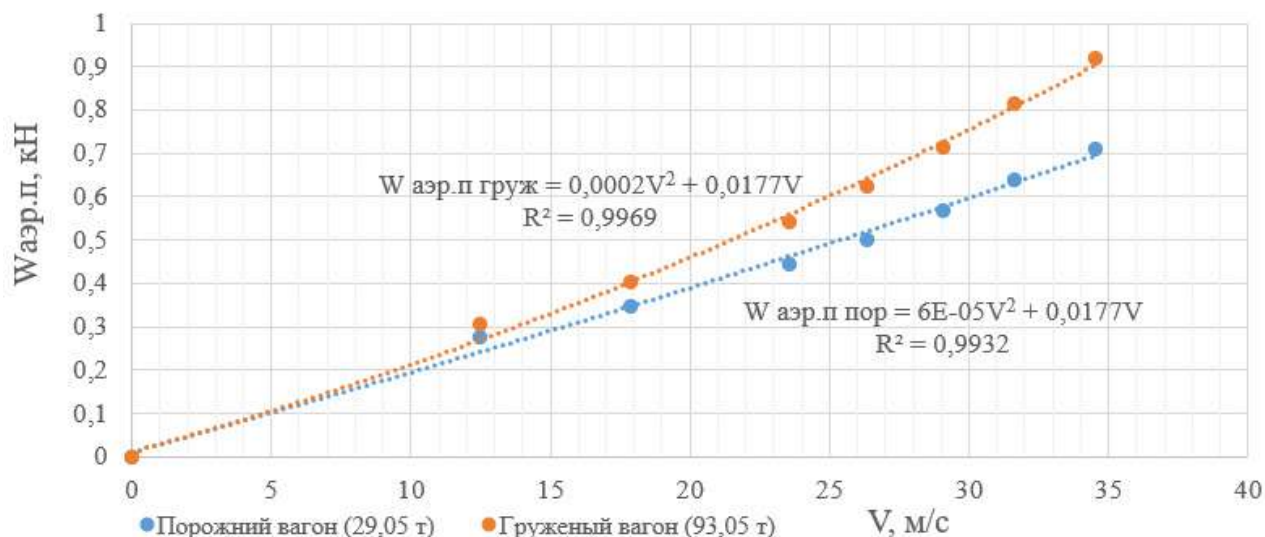


Рис. 12. Графики зависимости полного аэродинамического сопротивления исследуемого вагона в составе поезда от скорости его движения в груженом и порожнем состояниях

Результаты расчета полного аэродинамического сопротивления одиночного вагона $w_{\text{аэр.0}}$ и вагона в составе поезда $w_{\text{аэр.п}}$, основного сопротивления движению одиночного вагона определенной экспериментально w_{k0} , основного сопротивления движению вагона в составе поезда w_k в груженом и порожнем режимах загрузки, пересчитанные для средних скоростей движения вагона в режиме выбега, представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета основного сопротивления движению вагона в составе поезда, определенного экспериментально с применением цифровых моделей

Порожний режим								
w_p , кН	Средняя скорость движения вагона в режиме выбега, км/ч							
	27,8	44,9	64,4	84,8	94,8	104,6	113,9	124,3
$w_{\text{аэр.0}}$	0,39	1,08	2,00	3,32	4,16	4,93	5,74	6,53
$w_{\text{аэр.п}}$	0,23	0,28	0,35	0,44	0,50	0,57	0,64	0,71
w_{k0}	0,55	1,36	2,42	4,00	5,01	5,96	6,85	7,85
w_k	0,39	0,55	0,77	1,12	1,35	1,60	1,74	2,04
Груженный режим								
w_p , кН	Средняя скорость движения вагона в режиме выбега, км/ч							
	24,7	44,2	64,5	85,0	94,7	105,0	114,8	125,0
$w_{\text{аэр.0}}$	0,33	0,94	1,81	2,58	3,74	4,33	5,43	6,61

Окончание ТАБЛИЦЫ 3

$w_{\text{аэр.л}}$	0,24	0,30	0,40	0,54	0,62	0,71	0,81	0,92
w_{k0}	0,83	1,56	2,62	3,49	4,78	5,55	6,79	8,14
w_k	0,75	0,93	1,22	1,45	1,66	1,94	2,17	2,45

Дополнительно основное сопротивление движению исследуемого вагона в составе поезда определялось по формуле правил тяговых расчетов для поездной работы (ПТР) [15]:

$$w_{\text{ПТР}} = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785v + 0,027v^2}{q_0}, \quad (16)$$

где q_0 — нагрузка на ось.

Результаты расчета основного удельного сопротивления движению исследуемого вагона в составе поезда в соответствии с формулой, представленной в ПТР, и в соответствии с проведенным экспериментом с применением цифровых моделей w_k представлены в табл. 4 и на рис. 13 и 14.

ТАБЛИЦА 4. Сравнение результатов расчета основного сопротивления движению исследуемого вагона в соответствии с проведенным экспериментом с применением цифровых моделей и с ПТР

Порожний режим								
w_i , кН	Средняя скорость движения вагона в режиме выбега, км/ч							
	27,8	44,9	64,4	84,8	94,8	104,6	113,9	124,3
w_k	0,39	0,55	0,77	1,12	1,35	1,60	1,74	2,04
$w_{\text{ПТР}}$	0,44	0,64	0,94	1,34	1,56	1,81	2,08	2,37
Относительная разность, %	11	14	18	17	14	12	16	14
Груженный режим								
w_i , кН	Средняя скорость движения вагона в режиме выбега, км/ч							
	24,7	44,2	64,5	85,0	94,7	105,0	114,8	125,0
w_k	0,75	0,93	1,22	1,45	1,66	1,94	2,17	2,45
$w_{\text{ПТР}}$	0,79	0,98	1,27	1,66	1,88	2,12	2,36	2,66
Относительная разность, %	6	5	4	12	12	9	8	8

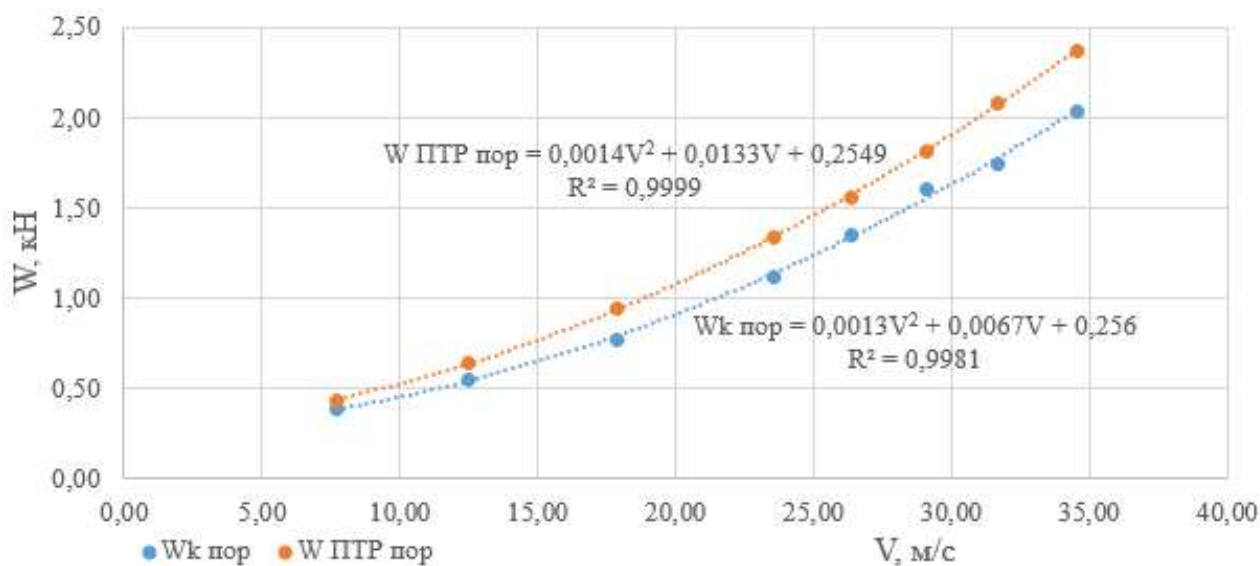


Рис. 13. Графики зависимости основного сопротивления движению исследуемого вагона в соответствии с ПТР и проведенным экспериментом с применением цифровых моделей от скорости движения в порожнем состоянии

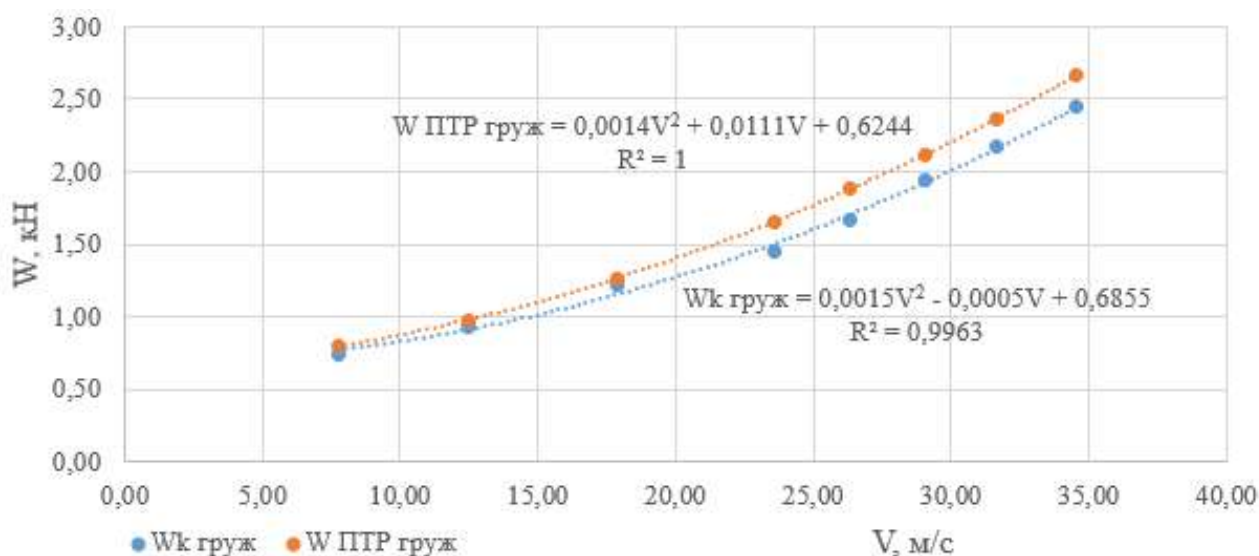


Рис. 14. Графики зависимости основного сопротивления движению исследуемого вагона в соответствии с ПТР и проведенным экспериментом с применением цифровых моделей от скорости движения в груженом состоянии

Выводы

1. Полученные в 60-х годах прошлого века коэффициенты в выражении для определения основного сопротивления движению грузовых вагонов, представленные в правилах тяговых расчетов для поездной работы, устарели и на сегодняшний день требуют актуализации. Используемые в ПТР формулы завышают

основное сопротивление движению для полувагона модели 12-1293-03 в диапазоне скоростей 60–130 км/ч на 17–18 %.

2. Предложена методика определения основного сопротивления движению вагона при проведении ходовых тормозных испытаний, заключающаяся в измерении замедления исследуемого вагона за период уменьшения скорости его движения на 10 км/ч до включения тормоза с учетом посекудной регистрации его положения и сопоставления зарегистрированных координат с мгновенной величиной уклона пути, что позволяет существенно повысить точность измерений.

3. Разработанная методика испытаний по определению основного сопротивления движению грузовых вагонов при проведении ходовых тормозных испытаний позволяет повысить точность и существенно сократить расходы на испытания. Методика рекомендуется к использованию для определения основного сопротивления движению вагонов и оценки их энергоэффективности.

Список источников

1. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: учебник для вузов / В. А. Гапанович [и др.]; под ред. В. А. Гапановича. М.: Изд. дом МИСиС, 2012. 620 с.

2. Об энергосбережении и о повышении энергетической энергоэффективности: федер. закон от 23.11.2009 № 261.

3. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года. М., 2022.

4. Оценка энергоэффективности работы железнодорожного транспорта применением специализированных удельных единиц измерения / Т. С. Титова [и др.] // Известия ПГУПС. 2017. Вып. 1. С. 119–127.

5. Виноградова С. А., Попов К. М. Цифровые технологии повышения энергетической эффективности железнодорожных перевозок // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 42–45.

6. Комарова А. Н., Бороненко Ю. П. Сравнительная оценка сопротивления движению грузовых вагонов на тележках различных типов // Транспорт Российской Федерации. 2014. № 3 (52). С. 69–72.

7. Захаров А. Н., Ромен Ю. С., Певзнер В. О. Оценка сопротивления движению грузовых вагонов в зависимости от положения осей колесных пар в тележках и состояния пути // Вестник ВНИИЖТ. 1996. № 2. С. 33–36.

8. Соколов А. М., Орлова А. М. Осевая нагрузка 27 тс — новая веха развития вагоностроения // Вагоны и вагонное хозяйство. 2016. № 3 (47). С. 5–7.

9. Астахов П. Н. Сопротивление движению железнодорожного подвижного состава. М.: Транспорт, 1966. 176 с.

10. Бороненко Ю. П., Поляков Б. О., Белгородцева Т. М. Определение аэродинамического сопротивления грузовых поездов с инновационными полувагонами на цифровых моделях // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2021. № 1–2 (92–93). С. 57–62.

11. Чурков Н. А. Аэродинамика железнодорожного поезда. Принципы конструирования подвижного состава, минимизирующие воздействия воздушной среды на поезд. М.: Желдориздат, 2006. 331 с.

12. Методика определения сопротивления движению поезда в выполненной поездке по данным электронного регистратора параметров движения / А. В. Климович [и др.] // Известия Транссиба. 2010. № 3. С. 16–25.

13. Крон И. Р., Поляков Б. О. Расчетно-экспериментальный метод определения основного сопротивления движению подвижного состава с применением цифровых моделей // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2021. № 4 (95). С. 50–53.

14. Крон И. Р. Расчетно-экспериментальный метод определения основного сопротивления движению грузовых вагонов с применением цифровых моделей: специальность: дисс. ... канд. техн. наук / ФГБОУ ВО ПГУПС. СПб., 2023. 136 с.

15. Правила тяговых расчетов для поездной работы: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р.

Дата поступления: 13.02.2026

Решение о публикации: 04.03.2026

Контактная информация:

БОРОНЕНКО Юрий Павлович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство»; boron49@yandex.ru

КОМАЙДАНОВ Алексей Андреевич — аспирант, ассистент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; komaidanovnvc@yandex.ru.

Method for determining the primary obstacle to motion of freight wagons during running brake tests

Yu. P. Boronenko, A. A. Komaidanov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Boronenko Yu. P., Komaidanov A. A. Method for determining the primary obstacle to motion of freight wagons during running brake tests // Bulletin of scientific research results. 2026, iss. 1, pp. 154–173. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-154-173. (In Russian)*

Abstract

Objective: to develop an advanced method for determining the primary resistance to motion of freight wagons during running brake tests, aimed at enhancing measurement accuracy and reducing test costs.

Methods: the primary resistance to the motion of a single wagon was determined experimentally, while

the aerodynamic component of a single wagon and that within a train was calculated using digital models. **Results:** a methodology for determining the primary resistance to the movement of freight wagons during running braking tests has been developed and validated, which allows for a significant reduction in test costs. **Practical significance:** the study will enable a significant decrease in the expenses involved in evaluating resistance to motion. At the same time, the proposed approach will increase the precision of measurements by removing a number of errors. The developed method may be applied during the acceptance trials of newly manufactured railway wagons. Its use allows for more accurate estimation of basic running resistance, which, in turn, will support a more reliable assessment of their energy performance.

Keywords: freight wagon, resistance to movement, energy efficiency of the wagon, running brake tests

References

1. Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte: uchebnik dlya vuzov / V.A. Gapanovich [i dr.]; pod red. V.A. Gapanovicha. M.: Izd. dom MISiS, 2012. 620 s. (In Russian)
2. Ob energoberezhenii i o povyshenii energeticheskoy energoeffektivnosti: feder. zakon ot 23.11.2009 no. 261. (In Russian)
3. Energeticheskaya strategiya OAO "RZHD" na period do 2030 goda i na perspektivu do 2035 goda. M., 2022. (In Russian)
4. Ocenka energoeffektivnosti raboty zheleznodorozhnogo transporta primeneniem specializirovannykh udel'nykh edinic izmereniya / T. S. Titova [i dr.] // Izvestiya PGUPS. 2017. Vyp. 1. S. 119–127. (In Russian)
5. Vinogradova S. A., Popov K. M. Cifrovye tekhnologii povysheniya energeticheskoy effektivnosti zheleznodorozhnykh perevozok // Zheleznodorozhnyy transport. 2019. No. 7. S. 42–45. (In Russian)
6. Komarova A. N., Boronenko Yu. P. Sravnitel'naya ocenka soprotivleniya dvizheniyu gruzovykh vagonov na telezhkakh razlichnykh tipov // Transport Rossijskoj Federacii. 2014. No. 3 (52). S. 69–72. (In Russian)
7. Zaharov A. N., Romen Yu. S., Pevzner V. O. Ocenka soprotivleniya dvizheniyu gruzovykh vagonov v zavisimosti ot polozheniya osey kolesnykh par v telezhkakh i sostoyaniya puti // Vestnik VNIIZHT. 1996. No. 2. S. 33–36. (In Russian)
8. Sokolov A. M., Orlova A. M. Osevaya nagruzka 27 ts — novaya vekha razvitiya vagonostroeniya // Vagony i vagonnoe hozyajstvo. 2016. No. 3 (47). S. 5–7. (In Russian)
9. Astahov P. N. Soprotivlenie dvizheniyu zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. M.: Transport, 1966. 176 s. (In Russian)
10. Boronenko Yu. P., Polyakov B. O., Belgorodceva T. M. Opredelenie aerodinamicheskogo soprotivleniya gruzovykh poezdov s innovacionnymi poluvagonami na cifrovyykh modelyakh // Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike. 2021. No. 1–2 (92–93). S. 57–62. (In Russian)
11. Churkov N. A. Aerodinamika zheleznodorozhnogo poezda. Principy konstruirovaniya podvizhnogo sostava, minimiziruyushchie vozdejstviya vozduшной sredy na poezd. M.: Zheldorizdat, 2006. 331 s. (In Russian)

12. Metodika opredeleniya soprotivleniya dvizheniyu poezda v vypolnennoj poezdke po dan-
nym elektronnoho registratora parametrov dvizheniya / A. V. Klimovich [i dr.] // Izvestiya Transsiba.
2010. No. 3. S. 16–25. (In Russian)

13. Kron I. R., Polyakov B. O. Raschetno-eksperimental'nyj metod opredeleniya osnovno-
go soprotivleniya dvizheniyu podvizhnogo sostava s primeneniem cifrovyh modelej // Transport
Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike. 2021. No. 4 (95). S. 50–53. (In Russian)

14. Kron I. R. Raschetno-eksperimental'nyj metod opredeleniya osnovnogo soprotivleniya
dvizheniyu gruzovyh vagonov s primeneniem cifrovyh modelej: special'nost': diss. ... kand. tekhn.
nauk / FGBOU VO PGUPS. SPb., 2023. 136 s. (In Russian)

15. Pravila tyagovyh raschetov dlya poezdnoj raboty: utv. rasporyazheniem OAO “RZHD” ot
12.05.2016 No. 867r. (In Russian)

Received: 13.02.2026

Accepted: 04.03.2026

Author’s information:

Yuri P. BORONENKO — D. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Department of “Wagons
and Wagon Facilities”; boron49@yandex.ru

Aleksey A. KOMAIDANOV — Postgraduate Student, Teaching Assistant of the Department of
“Wagons and Wagon Facilities”; komaidanovnc@yandex.ru

УДК 656.073.26

Методика распределения порожних контейнеропотоков в условиях транспортно-логистического центра

Д. С. Аскендерова, Е. А. Кайкина, А. В. Новичихин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Аскендерова Д. С., Кайкина Е. А., Новичихин А. В. Методика распределения порожних контейнеропотоков в условиях транспортно-логистического центра // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 174–184. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-174-184

Аннотация

Цель: повышение эффективности функционирования логистической системы на основе оптимизации порожних контейнеропотоков. **Методы:** системный анализ статистических данных о состоянии контейнерных перевозок, теория математического моделирования, теория алгоритмизации для разработки технологических решений обработки порожних контейнеров в рамках функционирования транспортно-логистического центра. **Результаты:** предложена математическая постановка задачи оптимизации распределения порожнего контейнеропотока в условиях транспортно-логистического центра. Разработана методика совершенствования технологического процесса обработки порожних контейнеропотоков в рамках функционирования транспортно-логистического центра. **Практическая значимость:** внедрение предложенной методики переработки порожних контейнеропотоков позволит повысить эффективность функционирования транспортно-логистического центра. Оптимизация распределения порожних контейнеров между железнодорожными станциями и транспортно-логистическим центром позволит повысить пропускную способность транспортно-логистической системы и сократить порожний пробег контейнеров.

Ключевые слова: контейнер, транспортно-логистическая система, транспортно-логистический центр, железнодорожная станция, мультимодальные перевозки, математическая задача, алгоритм, система планирования

Введение

В современной транспортной системе контейнерные перевозки являются одним из ключевых способов доставки грузов. Основными местами обработки контейнеропотоков, перевозимых различными видами транспорта, являются транспортно-логистические центры (далее — ТЛЦ) [1].

Объемы перевозок в контейнерах с каждым годом показывают положительную динамику. Но к концу 2024 года показатели импортных перевозок контейнеров упали на 0,05 млн контейнеров в двадцатифутовом эквиваленте (далее — ДФЭ) по сравнению с 2023 годом, действующим терминалам не хватает мощностей перерабатывать входящий поток [2]. К первому полугодю 2025 года показатели контейнерных перевозок по сравнению с первым полугодием 2024-го упали на 2,9% и составили 3,2 млн ДФЭ [3]. Большой спад пришелся на внутренние перевозки по причине снижения объемов погрузки угля, лома черных металлов [4]. На рис. 1 показаны объемы перевозок в контейнерах за первое полугодие 2025 года. [5].

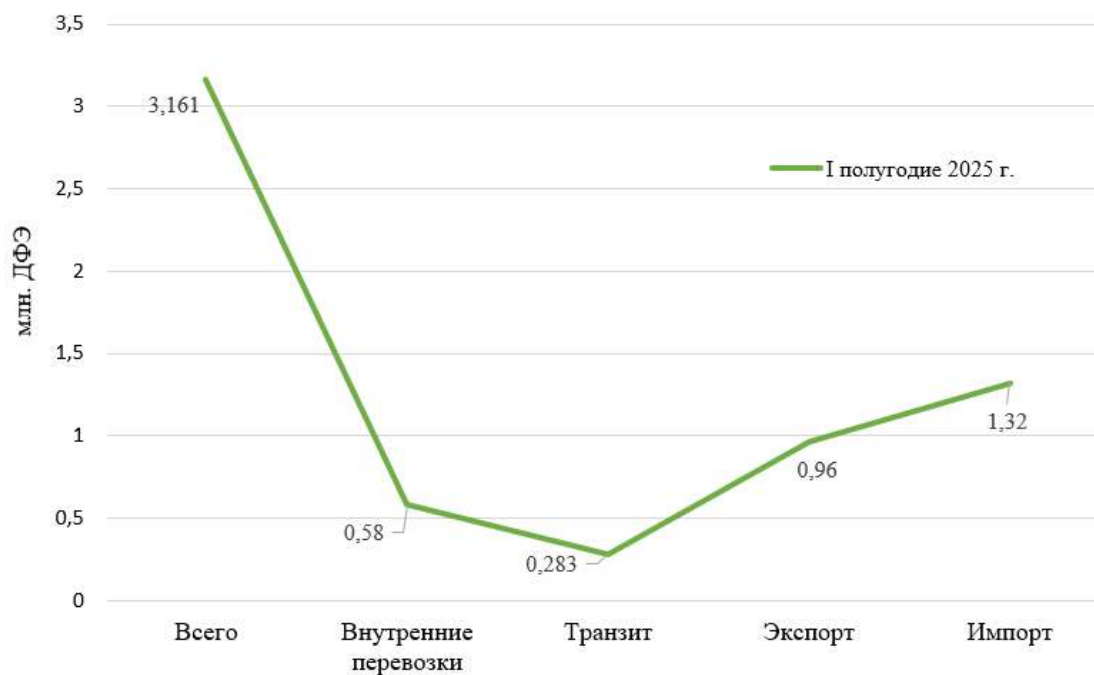


Рис. 1. Объемы контейнерных перевозок за первое полугодие 2025 года в России [5]

Стоит отметить, что показатели объемов контейнерных перевозок во внутреннем сообщении влияют и на показатели импорта [6]. Так, при снижении объемов перевозок угля в полувагонах в сторону Дальневосточного полигона возникает дефицит порожнего подвижного состава, вследствие этого импортные грузы простаивают в портах Дальнего Востока. Образуется неравномерное распределение порожнего парка вагонов, по причине этого сокращаются нитки графиков для приема порожних контейнеров по направлению к Дальнему Востоку [7]. Из-за этого возникают проблемы и в западной части России, так как прибывающие в адрес ТЛЦ груженые контейнеры после выгрузки простаивают на контейнерных площадках по причине сокращения ниток графика порожних контейнеров в порты Дальнего Востока.

Проблемы организации контейнерных перевозок рассматривали такие авторы, как О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева [8], Ю. С. Никонов, Г. М. Третьяков [9], Д. И. Кочнева [10] и др. В этих работах рассматриваются методические особенности организации контейнерных перевозок на железнодорожном транспорте в современных условиях, а также выделяются проблемы функционирования контейнерной транспортной системы.

Несмотря на большое количество научных работ на тему организации контейнерных перевозок, требуется проведение дальнейших исследований, так как проблемы взаимодействия железнодорожного транспорта и ТЛЦ в вопросах распределения контейнеропотоков рассматриваются недостаточно.

Исходя из этого, актуальной научно-практической задачей является разработка методики распределения порожних контейнеров в рамках ТЛЦ.

В настоящее время технологический процесс переработки контейнеропотока на ТЛЦ состоит из 8 блоков операций и представлен в интерпретации диаграммы IDEF0 на рис. 2.

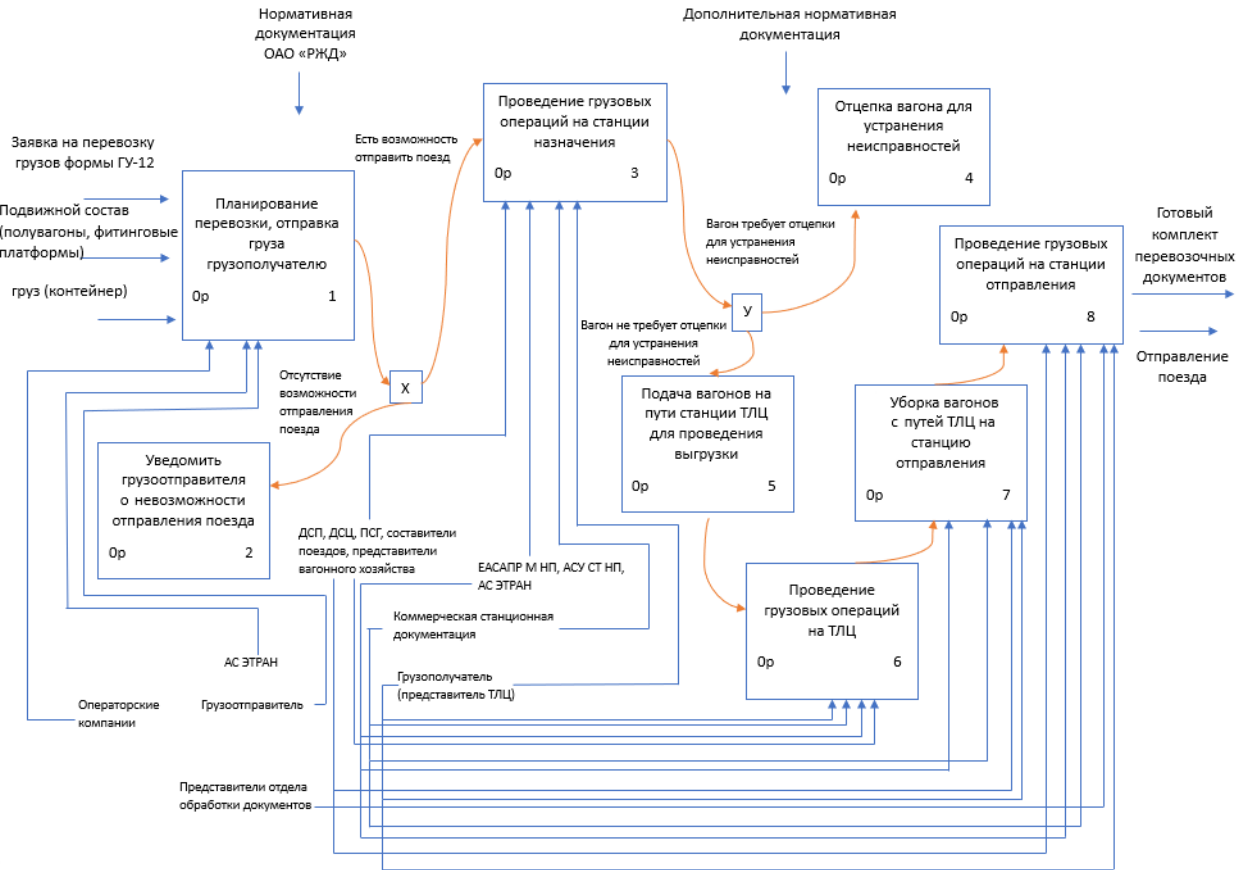


Рис. 2. Переработка контейнеропотока на ТЛЦ в интерпретации диаграммы IDEF0:

1. Планирование перевозки, отправка груза грузополучателю; х — при отсутствии возможности отправления поезда.
2. Уведомить грузоотправителя о невозможности отправления поезда; х — есть возможность отправления поезда.
3. Проведение грузовых операций на станции назначения; у — вагон требует отцепки для устранения неисправностей.
4. Отцепка вагона для устранения неисправностей; у — вагон не требует отцепки для устранения неисправностей.
5. Подача вагонов на пути ТЛЦ для проведения выгрузки.
6. Проведение грузовых операций на ТЛЦ.
7. Уборка вагонов с путей ТЛЦ на станцию отправления.
8. Проведение грузовых операций на станции отправления.

На основе поставленной научно-практической задачи предлагается разработка методики распределения порожних контейнеропотоков в рамках функционирования ТЛЦ по методу интеллектуального планирования.

Первым этапом при построении методики является постановка математической задачи, представленная ниже.

Постановка задачи распределения контейнеропотоков в условиях функционирования транспортно-логистического центра

Пусть логистическая цепь, состоящая из i -го ТЛЦ и j -й железнодорожной станции, характеризуется:

1. Показателем экономических затрат на перевозку a -го порожнего контейнеропотока от i -го ТЛЦ до j -й железнодорожной станции:

$$C_{i,j,a}, i \in N, j \in M, a \in D.$$

2. Показателем времени следования a -го порожнего контейнеропотока от i -го ТЛЦ до j -й железнодорожной станции:

$$T_{i,j,a}, i \in N, j \in M, a \in D,$$

где D — множество порожних контейнеропотоков между ТЛЦ и железнодорожной станцией, состоящих из x_p порожних контейнеров;

N и M — множества ТЛЦ и железнодорожных станций, функционирующих в рамках одной транспортно-логистической системы.

3. Показателем объема контейнеропотока, переработанного в рамках ТЛЦ и состоящего из порожних x_p и груженых x_g контейнеров:

$$KP_i, i \in N.$$

Требуется оптимизировать распределение порожнего контейнеропотока между i -м ТЛЦ и j -й железнодорожной станцией с целью сокращения порожнего пробега.

Тогда целевые функции показателей:

$$F(C) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{a=1}^D c_{i,j,a} \rightarrow \min;$$

$$F(T) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{a=1}^D t_{i,j,a} \rightarrow \min;$$

$$F(KP) = \sum_{p=1} x_p + \sum_{g=1} x_g \rightarrow \max$$

при условии:

$$T \geq 0, C \geq 0, KP > 0,$$

где x_p — порожние и x_g — груженые контейнеры, p и g — количество порожних и груженых контейнеров, переработанных на ТЛЦ за период времени t .

Методика представлена в рамках алгоритма обработки исходящего контейнеропотока (рис. 3 а, 3 б, 3 в).

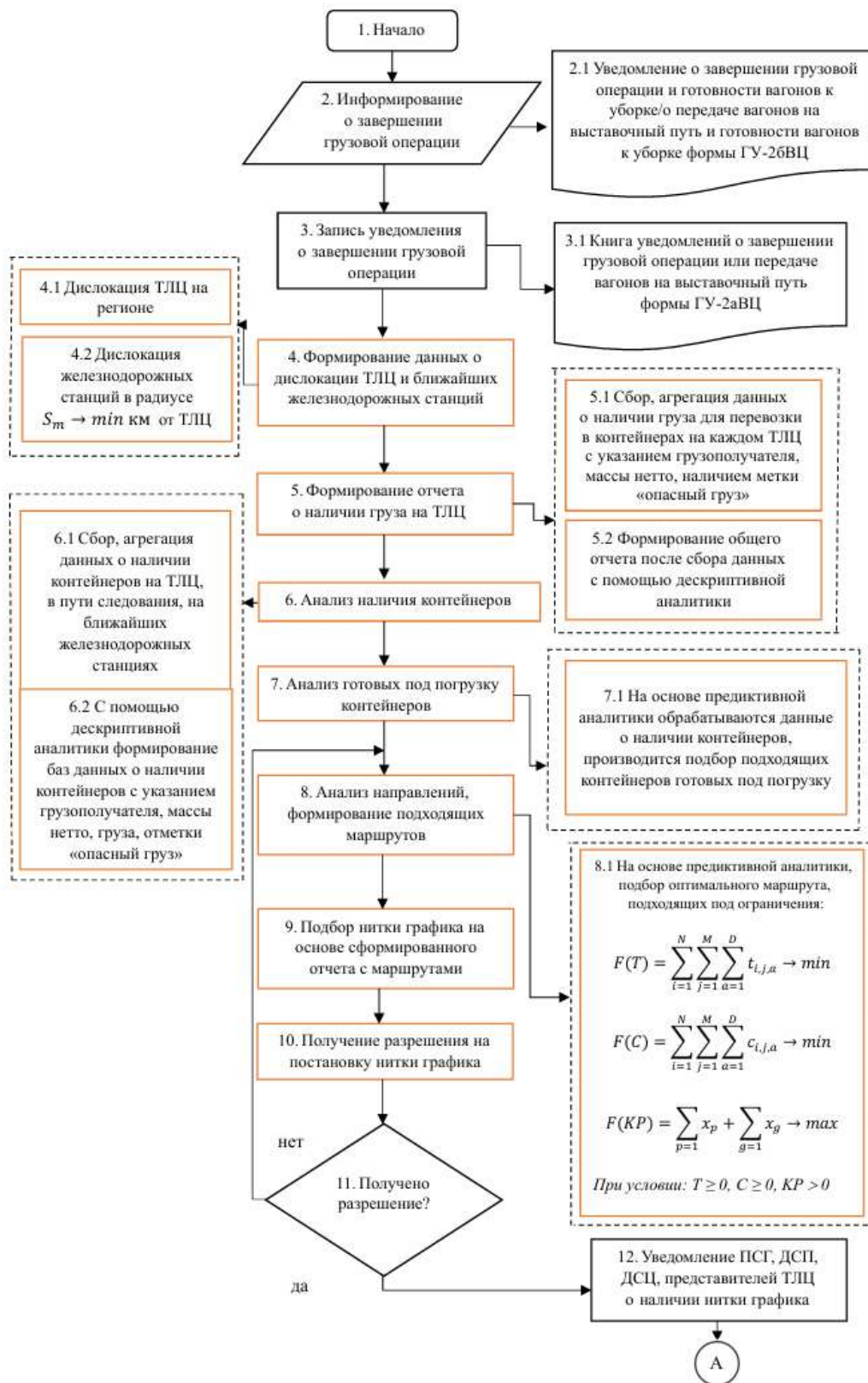


Рис. 3 а. Алгоритм обработки исходящего порожнего контейнеропотока на ТЛЦ

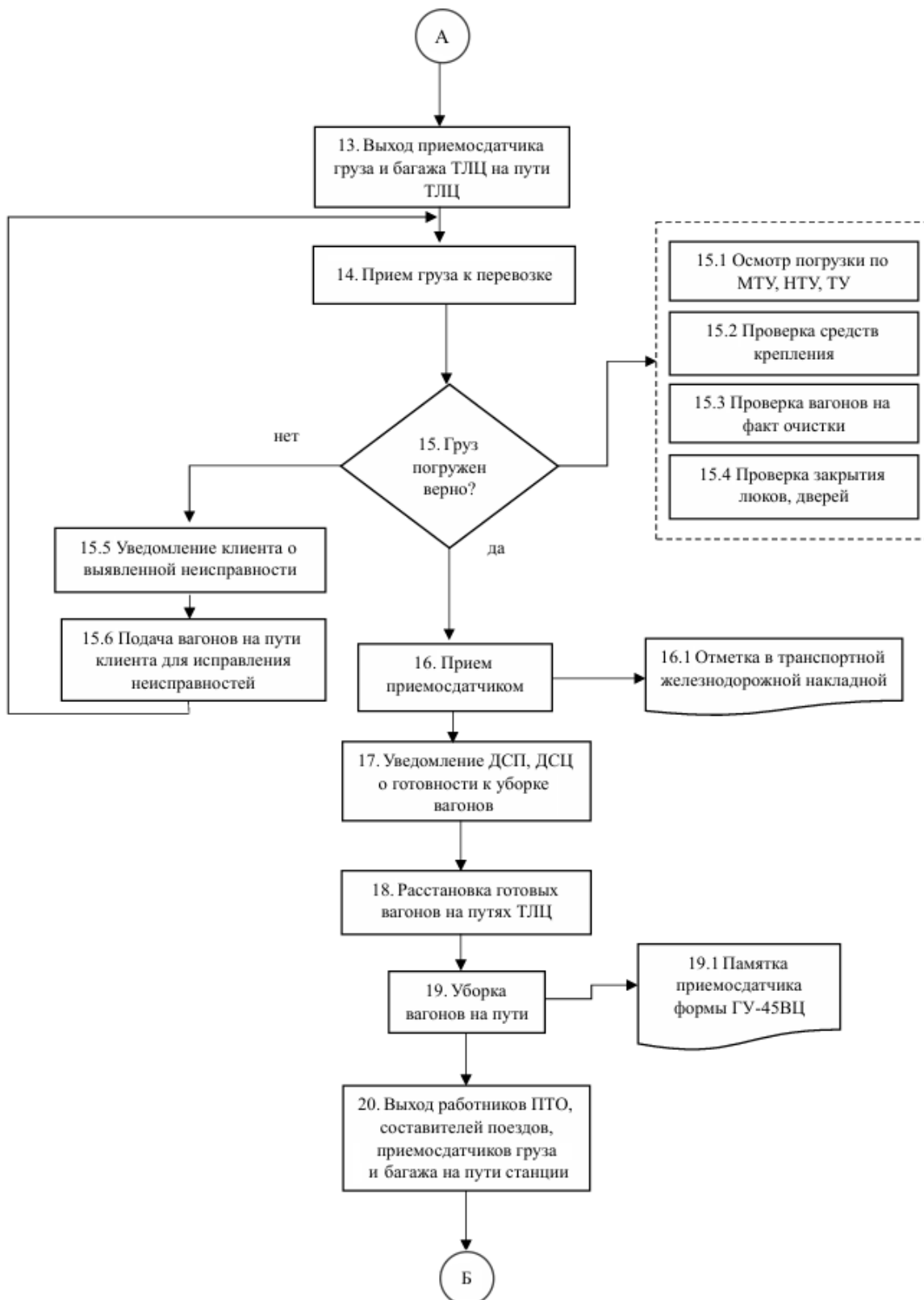


Рис. 3 б. Алгоритм обработки исходящего порожнего контейнеропотока на ТЛЦ

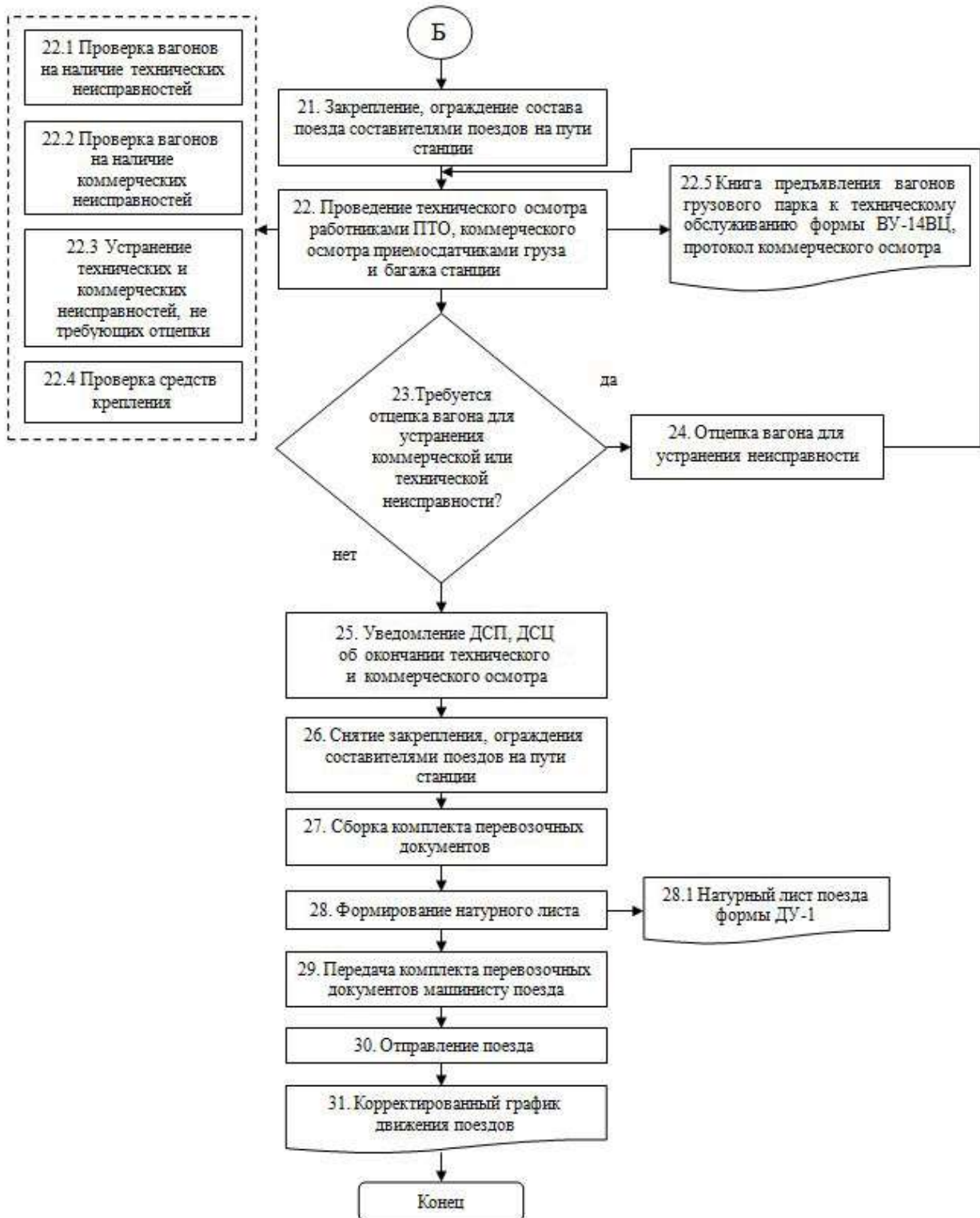


Рис. 3 в. Алгоритм обработки исходящего порожнего контейнеропотока на ТЛЦ

Новые блоки, интегрированные в алгоритм обработки исходящего контейнеропотока на ТЛЦ, включают в себя следующие операции (задачи):

1. Сбор данных о дислокации ТЛЦ и формирование списка железнодорожных станций, находящихся в минимальном радиусе от ТЛЦ.

2. Формирование отчета о наличии груза на ТЛЦ, в который входит информация о наличии груза для перевозки в контейнерах с указанием грузополучателя, массы нетто, сведений о наличии отметки «опасный груз».

3. Анализ наличия груженых и порожних контейнеров на ТЛЦ, в пути следования и на ближайших железнодорожных станциях.

4. С помощью дескриптивной аналитики формируется база данных о наличии контейнеров с информацией, собранной в пункте 2.

5. Анализ готовых под погрузку порожних контейнеров, подходящих по условиям для погрузки груза.

6. Анализ направлений и формирование оптимальных маршрутов с учетом следующих показателей: время доставки (Т), стоимость доставки (С), контейнеропоток (КР).

7. Подбор нитки графика. По согласованию с представителями Дирекции управления движением.

8. Формирование контейнерного поезда.

Предлагаемая методика распределения порожнего контейнеропотока позволит сократить порожний пробег и повысить эффективность функционирования транспортно-логистической системы. Для применения на реальном объекте необходимы программное обеспечение с применением искусственного интеллекта для анализа состояния транспортно-логистической сети, сбор и анализ данных о порожних контейнеропотоках.

Заключение

Таким образом, в работе проведен анализ состояния объемов контейнерных перевозок в России за последние три года. Кроме того, были изучены научные работы отечественных авторов. Объектом исследования является ТЛЦ для изучения процесса его функционирования, построена диаграмма технологического процесса переработки контейнеропотока в интерпретации диаграммы IDEF0.

На основе проведенного анализа сформулирована актуальная научно-практическая задача, а именно: разработка методики распределения порожних контейнеропотоков в рамках ТЛЦ.

Первым этапом построения методики является поставленная математическая задача, в которой представлены целевые функции ключевых показателей контейнеропотока в рамках функционирования ТЛЦ.

Следующим этапом предлагается совершенствование технологического процесса переработки исходящего порожнего контейнеропотока, которое приведено в виде алгоритма на рис. 3 а, 3 б, 3 в. Распределение порожних контейнеров между ТЛЦ и ближайшими железнодорожными станциями производится с учетом оптимальности показателей: времени, затрат и объемов контейнеропотока.

Таким образом, предлагаемая методика позволит повысить пропускную способность транспортно-логистической системы, в том числе ТЛЦ, благодаря оптимизации распределения порожних контейнеропотоков.

Список источников

1. Транспортно-логистические центры: пособие. URL: <https://mosregdata.ru/article/transport-logistics-centers-handbook?ysclid=mm0li64gkj104573301> (дата обращения: 10.12.2025).
2. Контейнерные перевозки: итоги 12 месяцев 2024 г. URL: <https://www.rzd-partner.ru/kolonka-eksperta/konteynerye-perevozki-itogi-12-mesyatsev-2024-goda/> (дата обращения: 05.01.2026).
3. Аствацатурова К. В., Казакова Н. А. Прогноз влияния рынка железнодорожных контейнерных перевозок на ВВП Российской Федерации // Финансы: теория и практика. 2022. № 26 (6). С. 6–16. DOI: 10.26794/25875671-2022-26-6-6-16.
4. Оценка инвестиционной привлекательности угольной отрасли России / Е. С. Матерова [и др.] // Уголь. 2025. № 3. С. 114–120. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-3-114-120.
5. СОЖТ: обзор за 6 мес. 2025 г. URL: <https://railsovet.ru/upload/iblock/b4f/lgqbqtnmwgt369xbrpnnlzazpvqsodk5.pdf> (дата обращения: 05.01.2026).
6. Ступникова Е. А., Разинкин Д. Н. Анализ неопределенности развития международных грузовых контейнерных перевозок // Вестник евразийской науки. 2023. С. 15.
7. Попова Н. Б., Корягин М. Е., Калидова А. Д. Работа контейнерных операторов на Западно-Сибирской железной дороге // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2. С. 165–172. DOI: 10.46973/0201-727X_2024_2_165.
8. Москвичев О. В., Москвичева Е. Е. Проблемы, пути решения и перспективы развития контейнерных перевозок в России // Вестник Самарской государственной академии путей сообщения. 2007. № 7. С. 9–11.
9. Третьяков Г. М., Москвичев О. В., Никонов Ю. С. Актуальные аспекты развития контейнерных перевозок // Вестник транспорта Поволжья. 2012. № 3 (33). С. 26–29.
10. Кочнева Д. И., Сметанина А. В. Оптимизационная модель распределения контейнерных потоков в терминальной сети с учетом маршрутной консолидации // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3. С. 138–144. DOI: 10.46973/0201-727X_2025_3_138.

Дата поступления: 03.02.2026

Решение о публикации: 04.03.2026

Контактная информация:

АСКЕНДЕРОВА Дарья Сергеевна — аспирант; dashylkalom135@yandex.ru

КАЙКИНА Екатерина Александровна — аспирант; kaikina_lkr@mail.ru

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук, доцент; novichikhin@pgups.ru

Methodology for distributing empty container flows within a transport and logistics center

D. S. Askenderova, E. A. Kaikina, A. V. Novitchihin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Askenderova D. S., Kaikina E. A., Novitchihin A. V. Methodology for distributing empty container flows within a transport and logistics center // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 174–184. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-174-184. (In Russian)

Abstract

Objective: to improve the efficiency of the logistics system by optimizing empty container flows. **Methods:** a systematic analysis of statistical data on the state of container transportation, mathematical modelling theory, and algorithmization theory were applied to develop technological solutions for handling empty containers within the framework of the transport and logistics center's operation. **Results:** the problem of optimizing the allocation of empty container flows within a transport and logistics center has been formulated mathematically. Within the context of the transport and logistics center's operations, a technique has been created to improve the technological process of managing empty container flows. **Practical importance:** the implementation of the proposed methodology for handling empty container flows will improve the efficiency of the transport and logistics center. Optimizing the distribution of empty containers between railway stations and the transport-logistics center will increase the carrying capacity of the transport and logistics system and reduce the empty mileage of containers.

Keywords: container, transport and logistics system, transport and logistics center, railway station, multimodal transportation, mathematical problem, algorithm, planning system

References

1. Transportno-logisticheskie tsentry: posobie. URL: <https://mosregdata.ru/article/transport-logistics-centers-handbook?ysclid=mm0li64gkj104573301> (data obrashcheniya: 10.12.2025). (In Russian)
2. Kontejnernye perevozki: itogi 12 mesyatsev 2024 g. URL: <https://www.rzd-partner.ru/kolonka-eksperta/konteynerye-perevozki-itogi-12-mesyatsev-2024-goda/> (data obrashcheniya: 05.01.2026). (In Russian)
3. Astvatsurova K. V., Kazakova N. A. Prognoz vliyaniya rynka zheleznodorozhnykh kontejnernykh perevozok na VVP Rossijskoj Federatsii // Finansy: teoriya i praktika. 2022. No. 26 (6). S. 6–16. DOI: 10.26794/25875671-2022-26-6-6-16. (In Russian)

4. Otsenka investitsionnoj privlekatel'nosti ugol'noj otrasli Rossii / E. S. Materova [i dr.] // Ugol'. 2025. No. 3. S. 114–120. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-3-114-120. (In Russian)
5. SOZhT: obzor za 6 mes. 2025 g. URL: <https://railsovet.ru/upload/iblock/b4f/lgqbqtnmwtg369xbrpnnlzazpvqsodk5.pdf> (data obrashcheniya: 05.01.2026). (In Russian)
6. Stupnikova E. A., Razinkin D. N. Analiz neopredelennosti razvitiya mezhdunarodnykh gruzovykh kontejnerykh perevozok // Vestnik evrazijskoj nauki. 2023. S. 15. (In Russian)
7. Popova N. B., Koryagin M. E., Kalidova A. D. Rabota kontejnerykh operatorov na Zapadno-Sibirskoj zheleznoj doroge // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. No. 2. S. 165–172. DOI: 10.46973/0201-727Kh_2024_2_165. (In Russian)
8. Moskvichev O. V., Moskvicheva E. E. Problemy, puti resheniya i perspektivy razvitiya kontejnerykh perevozok v Rossii // Vestnik Samarskoj gosudarstvennoj akademii putej soobshcheniya. 2007. No. 7. S. 9–11. (In Russian)
9. Tret'yakov G. M., Moskvichev O. V., Nikonov Yu. S. Aktual'nye aspekty razvitiya kontejnerykh perevozok // Vestnik transporta Povolzh'ya. 2012. No. 3 (33). S. 26–29. (In Russian)
10. Kochneva D. I., Smetanina A. V. Optimizatsionnaya model' raspredeleniya kontejnerykh potokov v terminal'noj seti s uchetom marshrutnoj konsolidatsii // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2025. No. 3. S. 138–144. DOI: 10.46973/0201-727X_2025_3_138. (In Russian)

Received: 03.02.2026

Accepted: 04.03.2026

Author's information:

Dar'ya S. ASKENDEROVA — Postgraduate Student; dashylkalom135@yandex.ru

Ekaterina A. KAJKINA — Postgraduate Student; kaikina_lkr@mail.ru

Aleksey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; novichikhin@pgups.ru

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 628.14

Анализ тепловых процессов внутри охлаждаемого надземного водовода с теплоизоляцией

В. Ф. Лапшин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Лапшин В. Ф. Анализ тепловых процессов внутри охлаждаемого надземного водовода с теплоизоляцией // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 185–195. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-185-195

Аннотация

Цель: выяснить роль конвективного и молекулярного механизмов теплообмена между водой и стенками трубопровода в процессе охлаждения надземного водовода с теплоизоляцией в условиях отрицательных температур окружающей среды. Получить аналитические выражения для зависимости чисел Нуссельта от средней температуры охлаждаемой воды и параметров трубопровода. Предложить средние значения чисел Нуссельта по интервалу температур, в котором происходит охлаждение воды, в качестве величин, определяющих скорость ее охлаждения. **Методы:** математическая модель процесса охлаждения водовода формулируется на основе уравнений гидромеханики и теплопроводности. Для получения аналитического решения модели используется квазистационарный подход, учитывающий, что процесс охлаждения воды происходит намного медленнее, чем процесс выравнивания температуры в стенке трубопровода и в слое теплоизолятора. Для характерных значений параметров водовода и внешней среды проводятся численные расчеты. **Результаты:** получены аналитические выражения для чисел Нуссельта при конвективном и молекулярном механизмах теплообмена между водой и стенками трубопровода. Выполнено сравнение эффективности этих механизмов и показано, что конвективный механизм является основным при охлаждении воды. Получены явные выражения для разности средней температуры воды в трубопроводе и на его внутренней поверхности. Показано, что процесс образования льда на внутренней поверхности трубопровода начинается еще до того, как весь объем воды остынет до температуры фазового перехода. Получена формула для расчета средней температуры воды, при которой начинается внутреннее обмерзание трубопровода. Для характерных значений параметров водовода выполнены численные расчеты этой температуры в широком диапазоне значений температуры окружающей среды. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют сформулировать адекватную математическую модель процесса охлаждения водовода с теплоизоляцией. Использование такой модели позволяет рассчитать динамику охлаждения воды и время до момента начала образования льда на внутренней поверхности трубопровода.

Ключевые слова: надземный водовод, конвективный и молекулярный механизмы теплообмена, коэффициент теплопередачи, математическая модель, граничное условие

Введение

При эксплуатации надземных водоводов в условиях отрицательных температур наружного воздуха возникает опасность замерзания в них воды и разрушения трубопровода. В связи с большой практической значимостью этого вопроса изучению процессов, протекающих при охлаждении и замерзании воды в трубопроводе, посвящено большое число работ [1–6]. Наиболее опасна в отношении замерзания ситуация, возникающая после прекращения движения воды в трубопроводе. Однако даже в этом случае процессы, протекающие при охлаждении воды, крайне сложны для математического описания. Это связано с тем, что этот процесс сопровождается возникновением естественной конвекции, для описания которой необходимо привлекать систему уравнений гидромеханики. Аналитическое решение задачи в этом случае невозможно, а численные расчеты выполнены только для некоторых частных случаев [1, 7]. По этой причине для расчетов охлаждения воды в трубопроводах в большинстве случаев используют упрощенные модели, в которых не учитывается естественная конвекция воды. При этом для моделирования динамики радиальных профилей температуры в неподвижной жидкости чаще всего применяется нестационарное уравнение теплопроводности [3]. В некоторых работах используется дополнительное предположение о том, что температура воды в процессе охлаждения одинакова во всех точках поперечного сечения трубопровода [6].

В настоящей работе формулируется математическая модель охлаждения воды в трубопроводе, учитывающая естественную конвекцию воды. Анализируются роли молекулярного и конвективного механизмов в охлаждении воды в трубопроводе с теплоизоляцией. Отдельно рассматривается вопрос о средней температуре воды, при которой начинается образование льда на внутренней поверхности трубопровода.

Уравнения модели

В работе предполагается, что водовод представляет собой заполненную водой трубу с внутренним радиусом R_1 , толщиной стенок ΔR , покрытую снаружи слоем теплоизоляции толщиной δ . В работах [8, 9] для процесса охлаждения водовода в случае прекращения движения в нем воды были сформулированы и обоснованы дифференциальные уравнения квазистационарной модели средних температур:

$$\rho_1 c_1 \frac{dT_1}{dt} = \frac{2}{R_1} \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_1}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0, \quad R_1 < r < R_2, \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_3}{\partial r} = 0, \quad R_2 < r < R_3. \quad (3)$$

Здесь $T_1(t)$ — средняя по объему температура воды в трубопроводе; $T_2(r, t)$ — температура стенки трубы, $T_3(r, t)$ — температура теплоизолятора; ρ_1, c_1 — плотность и удельная теплоемкость воды; λ_2 — теплопроводность материала стенки трубы; $R_2 = R_1 + \Delta R$ — внешний радиус трубы; ΔR — толщина стенок трубы; $R_3 = R_2 + \delta$ — внешний радиус водовода; δ — толщина слоя теплоизолятора.

При записи начальных условий для задачи (1–3) необходимо учесть, что время установления нового распределения температуры в стенке трубы и в слое теплоизолятора при изменении температуры внешней среды существенно меньше времени остывания воды [8, 9]. Это означает, что время остывания воды слабо зависит от начального распределения температуры в слоях водовода. По этой причине в настоящей работе считается, что в исходном состоянии температура воды, стенок трубы и теплоизолятора одинакова и равна заданному значению T_0 :

$$T_1(0) = T_2(r, 0) = T_3(r, 0) = T_0. \quad (4)$$

В начальный момент времени $t = 0$ температура внешней среды мгновенно понижается до значения T_{ex} меньшего, чем температура фазового перехода «вода — лед» T_{ph} . Далее, в процессе остывания водовода, величина T_{ex} считается постоянной. При записи граничных условий к уравнениям (2–3) при $r = R_2$ используются условия равенства температур и потоков тепла на границе трубопровода и слоя теплоизолятора:

$$T_2(R_2, t) = T_3(R_2, t), \quad (5)$$

$$\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_2} = \lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial r} \right|_{r=R_2}, \quad (6)$$

а на внутренней поверхности трубы при $r = R_1$ и внешней поверхности водовода при $r = R_3$ используется закон Ньютона:

$$-\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_1} = \alpha_1 (T_1(t) - T_2(R_1, t)), \quad (7)$$

$$-\lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial r} \right|_{r=R_3} = \alpha_3 (T_3(R_3, t) - T_{ex}). \quad (8)$$

Здесь $\alpha_1 = \lambda_1 Nu_1 / 2R_1$, $\alpha_3 = \lambda_a Nu_3 / 2R_3$ — коэффициенты теплоотдачи; Nu_1 и Nu_3 — критерии подобия Нуссельта; λ_a и λ_3 — коэффициенты теплопроводности воздуха и материала теплоизолятора соответственно. При вычислении значений Nu_3 в (8) использовались соотношения, приведенные в [3].

Уравнения (1–3) с условиями (4–8) составляют модель охлаждения водовода в квазистационарном приближении. В этом приближении уравнение (1) можно свести к уравнению относительно одной неизвестной величины $T_1(t)$. С этой целью решим уравнения (2–3) с условиями (5–8) относительно T_2 и T_3 и подставим полученные выражения в правую часть (1). Тогда получим следующее уравнение:

$$\frac{dT_1}{dt} = -C(T_1 - T_{ex}), \quad (9)$$

где

$$C = \frac{2\lambda_3}{\rho_1 c_1 R_1^2 \Delta},$$

$$\Delta = \ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right) + \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) + \frac{2\lambda_3}{\lambda_1 Nu_1} + \frac{2\lambda_3}{\lambda_a Nu_3}.$$

Кроме того, решение уравнений (2–3) позволяет найти разность между средней температурой воды T_1 и температурой внутренней поверхности трубопровода в процессе охлаждения водовода:

$$T_1(t) - T_2(R_1, t) = a(T_1 - T_{ex}), \quad (10)$$

где $a = 2\lambda_3 / (\lambda_1 Nu_1 \Delta)$. В частности, подставляя в (10) вместо T_2 температуру фазового перехода T_{ph} , можно найти значение средней температуры воды T_1^* в момент, когда начинается образование льда на внутренней поверхности трубы:

$$T_1^* - T_{ph} = \frac{a}{1-a}(T_{ph} - T_{ex}). \quad (11)$$

Анализ механизмов теплообмена внутри трубопровода

Для описания конвективного теплообмена при естественной (свободной) конвекции воды в горизонтальном трубопроводе использовались значения чисел Нуссельта Nu_C из работы [10]:

$$Nu_C = 1,215 Ra^{0,21}, \quad (12)$$

$$Ra = \frac{8R_1^3 g \beta_1(T_1)}{a_1 \nu_1} (T_1 - T_2(R_1)). \quad (13)$$

Здесь Ra — число Рэлея, g — ускорение свободного падения, a_1 и ν_1 — температуропроводность и кинематическая вязкость, $\beta_1(T_1)$ — коэффициент объемного расширения воды при температуре T_1 . Подставляя в (13) выражение (10), получаем для водовода с теплоизоляцией:

$$Nu_C = 1,904 \left[\frac{g\lambda_3\beta_1(T_1)R_1^3(T_1 - T_{ex})}{a_1\nu_1\lambda_1\Delta} \right]^{0,174}. \quad (14)$$

Отметим здесь, что число Nu_C в (14), а вместе с ним и скорость охлаждения воды в (1) и (9) обращаются в ноль при температуре 4 °С. В то же время скорость охлаждения не может быть меньше, чем в случае неподвижной воды, когда реализуется чисто молекулярный механизм теплообмена. Найдем число Нуссельта для такого случая. Охлаждение неподвижной воды в трубопроводе за счет теплопроводности происходит очевидно медленнее, чем при конвективном механизме. Поэтому квазистационарное приближение справедливо и в этом случае. Математическая модель охлаждения водовода при отсутствии конвекции в трубопроводе включает в себя по-прежнему уравнения (2–3) и, кроме того, нестационарное уравнение теплопроводности для температуры неподвижной воды $T_w(r, t)$:

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = a_1 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_w}{\partial r}. \quad (15)$$

Начальное и граничные условия (4–6), (8) сохраняются, а вместо (7) для воды используется традиционное условие:

$$\left. \frac{\partial T_w}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (16)$$

Решение уравнений (2–3) с условиями (5–6), (8) и, кроме того, с учетом непрерывности температуры и теплового потока на внутренней поверхности трубы позволяет получить второе граничное условие для T_w :

$$-\lambda_1 \left. \frac{\partial T_w}{\partial r} \right|_{r=R_1} = \alpha_w (T_w(R_1, t) - T_{ex}), \quad (17)$$

где $\alpha_w = \lambda_3/(R_1\Delta_0)$ и

$$\Delta_0 = \ln \left(\frac{R_3}{R_2} \right) + \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) + \frac{2\lambda_3}{\lambda_a Nu_3}.$$

Подробное решение уравнения теплопроводности (15) с условиями (16–17) для температуры воды $T_w(r, t)$ и ее среднего по объему значения $T_1(t)$ приведено в [11]. Использование этого решения позволяет получить формулу для числа Нуссельта в случае охлаждения неподвижной воды за счет теплопроводности:

$$Nu_T(t) = \frac{-\lambda_1 (\partial T_w / \partial r)|_{R_1}}{(\lambda_1 / 2R_1)[T_1(t) - T_w(R_1, t)]} = 2Bi \frac{\sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\mu_n^2 a_1 t / R_1^2)}{\sum_{n=1}^{\infty} (B_n - A_n) \exp(-\mu_n^2 a_1 t / R_1^2)}. \quad (18)$$

Здесь $Bi = \alpha_w R_1 / \lambda_1 = \lambda_3 / (\lambda_1 \Delta_0)$ — число Био; $A_n = 2Bi / (\mu_n^2 + Bi^2)$, $B_n = 2Bi A_n / \mu_n^2$; μ_n — корни уравнения $J_0(\mu)Bi = \mu J_1(\mu)$, где J_0 и J_1 — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно. Отметим, что коэффициенты A_n и B_n в (18) быстро уменьшаются с возрастанием n , поэтому при вычислениях учитывались только первые пять членов ряда.

Числа Нуссельта Nu_C и Nu_T характеризуют интенсивность теплопередачи от воды к стенке при конвективном и молекулярном механизмах переноса теплоты соответственно. Для сравнения этих чисел подставим в (18) решение [11] для $T_w(r, t)$ и $T_1(t)$, соответствующее начальному значению температуры $T_0 = 10$ °С. Все расчеты в настоящей работе выполнены для характерных значений геометрических параметров водовода $R_1 = 20$ см, $\Delta R = 1$ см, $\delta = 10$ см и стандартных значений [12] теплофизических параметров воды, стальной трубы, сухого воздуха и теплоизолятора (минеральной ваты). Результаты вычислений чисел Нуссельта по формулам (14) и (18) приведены на рис. 1. Прежде всего отметим, что число Nu_T быстро изменяется только в самом начале процесса охлаждения воды. Затем, в течение всего времени охлаждения, его значение остается практически постоянным и определяется первым членом в рядах (18):

$$Nu_T^{(1)} = \frac{2Bi\mu_1^2}{2Bi - \mu_1^2}. \quad (19)$$

Здесь μ_1 — наименьший корень уравнения $J_0(\mu)Bi = \mu J_1(\mu)$. При охлаждении водовода во всех интересных для практики случаях число Био заключено в интервале значений $0,1 < Bi < 1,0$. При этом число Нуссельта в (19) практически не изменяется и с погрешностью, не превышающей 3%, можно считать его постоянным и равным 7,7. Как видно из рис. 1, значения Nu_C в 5–7 раз превышают значения Nu_T при всех значениях температуры воды и температуры окружающей среды, характерных для эксплуатации водовода, кроме значений T_1 , близких к 4 °С. Это означает, что в процессе охлаждения воды конвективный механизм теплообмена играет определяющую роль. По этой причине в расчетах можно полагать $Nu_1 = Nu_C$.

Благодаря неоднородному распределению температуры воды в трубопроводе даже при средней температуре $T_1 = 4$ °С значения объемного коэффициента расширения воды β_1 в большей части объема отличны от нуля и конвекция не прекращается. Отметим также, что величина C в (9), описывающая скорость охлаждения воды, слабо зависит от чисел Нуссельта Nu_1 и Nu_3 , а сами эти числа слабо зависят

от температуры T_1 . Это позволяет вместо выражения (14) для Nu_C использовать его среднее значение \overline{Nu}_C по интервалу температуры от T_0 до T_{ph} . Величину C в этом случае можно считать постоянной, что позволяет решить уравнение (9) явно. Результаты расчетов \overline{Nu}_C приведены на рис. 2.

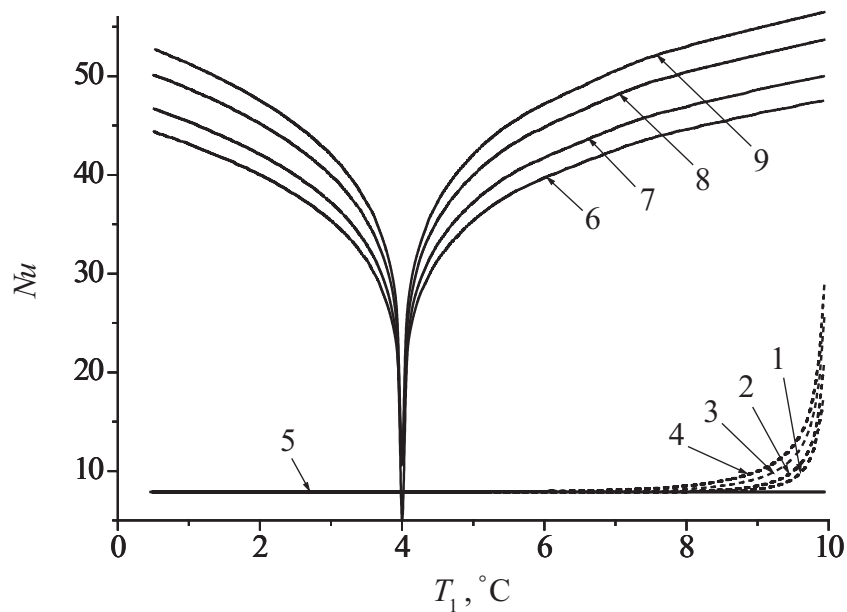


Рис. 1. Зависимость чисел Нуссельта Nu_T (кривые 1–4) и Nu_C (кривые 6–9) от средней температуры воды T_1 при различных значениях температуры окружающей среды T_{ex} : 1 и 6 — -5°C , 2 и 7 — -10°C , 3 и 8 — -20°C , 4 и 9 — -30°C , 5 — расчет Nu_T по формуле (19)

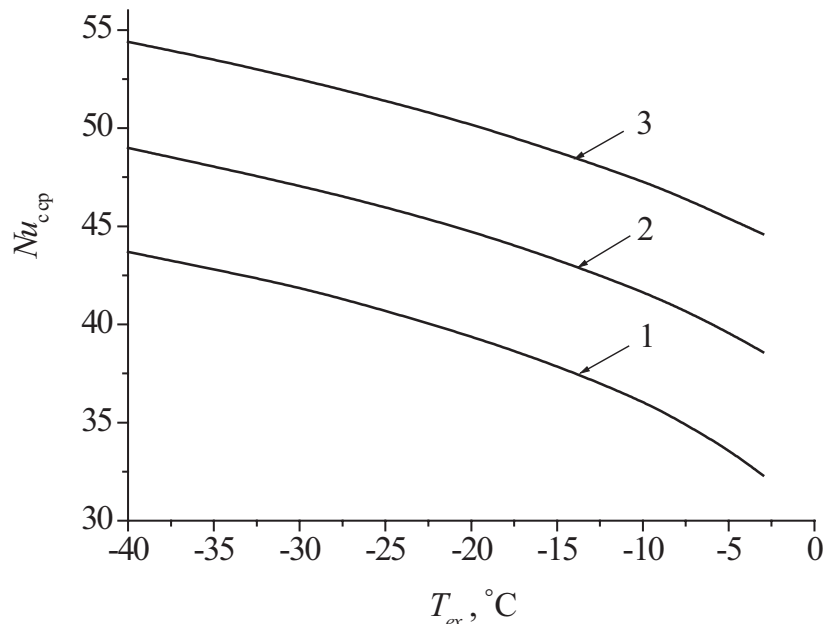


Рис. 2. Зависимость среднего числа Нуссельта \overline{Nu}_C от температуры окружающей среды T_{ex} при различных значениях начальной температуры T_0 : 1 — -5°C , 2 — -10°C , 3 — -15°C

Расчет температуры воды T_1^* в момент начала замерзания

Для характерных значений параметров водовода выполним здесь расчет значения средней по объему температуры воды T_1^* в момент, когда начинается образование льда на внутренней поверхности трубы. С этой целью воспользуемся средним числом Нуссельта \overline{Nu}_c для интервала значений температуры воды 0–5 °С (линия 1 на рис. 2). Результаты вычислений T_1^* приведены на рис. 3. Хорошо видно, что процесс замерзания воды начинается еще до того, как весь ее объем остынет до температуры фазового перехода T_{ph} . Вместе с тем отметим, что значения температуры T_1^* , соответствующей началу замерзания, составляют доли градуса, так что в большинстве случаев можно рассчитывать время охлаждения воды, пренебрегая временем охлаждения Δt^* от значения температуры T_1^* до T_{ph} и полагая $T_1^* = T_{ph}$. Тем более можно пренебрегать величиной Δt^* при расчете времени промерзания водовода, поскольку количество теплоты Q_c , выделяющееся при охлаждении воды, существенно меньше, чем количество теплоты, выделяющееся при ее замерзании Q_f : $Q_c/Q_f = c_1(T_1^* - T_{ph})/q < 0,013$, где q — удельная теплота плавления льда. Отметим здесь также, что чем больше радиус трубопровода и толще слой теплоизоляции, тем меньше будет разница между значениями средней температуры воды T_1^* и температурой замерзания T_{ph} .

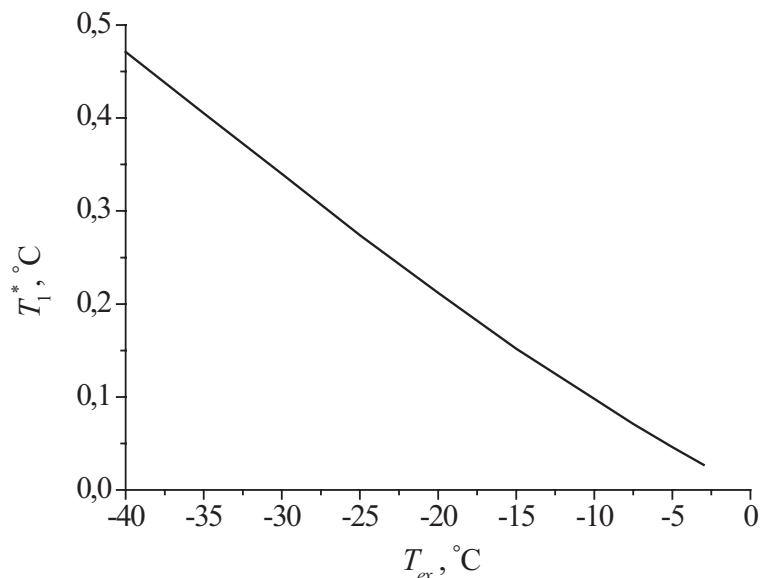


Рис. 3. Зависимость средней температуры воды T_1^* от температуры окружающей среды T_{ex} в момент времени, когда начинается образование льда на внутренней поверхности трубы

Заключение

В настоящей работе выполнен анализ тепловых процессов, протекающих в надземном водоводе с теплоизоляцией после прекращения подачи по нему воды. С этой целью сформулирована математическая модель охлаждения водовода и выполнено сравнение скоростей молекулярного и конвективного механизмов охлаждения воды.

Получены аналитические выражения для чисел Нуссельта, соответствующих этим механизмам охлаждения. Показано, что во всех режимах работы водовода определяющую роль играет конвективный механизм. Показано также, что скорость охлаждения воды определяется средними значениями конвективного числа Нуссельта по интервалу температур от T_0 до T_{ph} , в котором происходит охлаждение воды. Средние значения этих чисел вычислены для трех характерных для рассматриваемой задачи интервалов значений температуры воды. Показано, что процесс замерзания воды начинается еще до того, как весь ее объем остынет до температуры фазового перехода T_{ph} . Найдена формула для средней температуры воды в трубопроводе T_1^* , при которой начинается образование льда на внутренней поверхности трубы. Значения T_1^* вычислены для широкого диапазона температур наружной среды. Показано, что значения этой температуры составляют доли градуса Цельсия.

Список источников

1. Gilpin R. R. Cooling of a horizontal cylinder of water through its maximum density point at 4 °C // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1975. Vol. 18. Pp. 1307–1315.
2. Solving the problem of pipeline freezing with respect to external heat exchange / N. Parfentyeva [et al.] // *Mechanika*. 2015. Vol. 21 (5). Pp. 393–396. DOI: 10.5755/j01.mech.21.5.11411.
3. Mathematical simulation of the freezing time of water in small diameter pipes / A. McDonald [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 73 (1). Pp. 142–153. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.07.046.
4. Терехов Л. Д., Твардовская Н. В., Твардовская Е. А. Внутреннее обледенение водоводов в зимний период // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов (Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2021 года). СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. Т. 2. С. 161–164.
5. Terekhov L. D., Tvardovskaya N. V. Dynamics of internal pipeline icing in winter period when bringing it to freezing // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 402. Pp. 871–879. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_95.
6. Температурный режим в магистральных стальных трубопроводах горячего водоснабжения при нарушениях циркуляции / Д. Н. Китаев [и др.] // *Известия вузов. Строительство*. 2017. № 3 (699). С. 62–68.
7. Alawadhi E. M. Phase change process with free convection in a circular enclosure: numerical simulations // *Computers & Fluids*. 2004. Vol. 33 (10). Pp. 1335–1348. DOI: 10.1016/j.compfluid.2003.11.002.
8. Лапшин В. Ф. Расчет времени охлаждения надземного водовода с теплоизоляцией в условиях отрицательных температур // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2024. Т. 21, вып. 1. С. 103–112. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-103-112.
9. Lapshin V. F. Simulation of cooling of aboveground water pipeline with heat insulation // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 583. P. 02022. DOI: 10.1051/e3sconf/202458302022.
10. Martynenko O. G., Khramtsov P. P. Free-convective heat transfer. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. 518 p. DOI: 10.1007/3-540-28498-2.

11. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
12. Физические величины: справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

Дата поступления: 05.12.2025

Решение о публикации: 04.03.2026

Контактная информация:

ЛАПШИН Владимир Федорович — д-р физ.-мат. наук, профессор; lapshinvf@mail.ru

Analysis of heat transfer dynamics within surface-mounted insulated cooled water pipeline

V. F. Lapshin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Lapshin V. F. Analysis of heat transfer dynamics within surface-mounted insulated cooled water pipeline // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 185–195. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-185-195. (In Russian)*

Abstract

Objective: to determine the comparative contributions of convective and molecular heat-transfer mechanisms between the fluid and the pipeline walls during the cooling of an above-ground thermally insulated water pipeline subjected to subzero ambient environmental temperatures. To obtain analytical expressions that correlate the Nusselt numbers with the mean bulk temperature of the fluid undergoing cooling and the physical parameters of the pipeline's infrastructure. Furthermore, the study proposes the adoption of Nusselt numbers, averaged across the specific thermal range of the cooling phase, as the definitive metrics for quantifying the cooling rate. **Methods:** a mathematical model of the water-pipeline cooling process was performed based on hydromechanics and thermal conductivity equations. The analytical resolution of this model employed a quasi-stationary approximation. This methodological approach is predicated on the physical observation that the thermal decay of the water mass occurs on a significantly longer time scale than the rapid thermal equilibration within the pipe material and its insulating layers. Numerical calculations were carried out to represent typical operational and environmental parameters. **Results:** analytical expressions for Nusselt numbers under convective and molecular mechanisms of heat transfer between the water and the pipeline walls have been obtained. The efficiency of these mechanisms has been compared, showing that the convective mechanism is the dominant mechanism of cooling water. Explicit expressions have been derived for the difference between the average water temperature in the pipeline and the temperature of its inner surface. It has been demonstrated that ice nucleation on the inner surface of the pipeline initiates prior to the entire water volume reaching the phase-transition temperature. A predictive formula has been developed to calculate the average water temperature at which this internal icing commences. Numerical calculations applied to this formula over a broad spectrum of ambient temperatures provided further validation for typical pipeline configurations. **Practical significance:** the obtained results permit the formulation of a high-fidelity mathematical model describing the thermal behavior of insulated hydraulic systems. The use of such a model enables precise calculation of cooling dynamics, specifically allowing operators to determine the critical time window available before the onset of ice formation on the pipeline walls.

Keywords: surface-mounted water pipeline, convective and molecular heat exchange mechanisms, heat transfer coefficient, mathematical model, boundary condition

References

1. Gilpin R. R. Cooling of a horizontal cylinder of water through its maximum density point at 4 °C // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1975. Vol. 18. Pp. 1307–1315.
2. Solving the problem of pipeline freezing with respect to external heat exchange / N. Parfenyeva [et al.] // *Mechanika*. 2015. Vol. 21 (5). Pp. 393–396. DOI: 10.5755/j01.mech.21.5.11411.
3. Mathematical simulation of the freezing time of water in small diameter pipes / A. McDonald [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 73 (1). Pp. 142–153. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.07.046.
4. Terekhov L. D., Tvardovskaya N. V., Tvardovskaya E. A. Vnutrennee obledenenie vodovodov v zimnij period // III Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: sbornik trudov (Sankt-Peterburg, 2–3 dekabrya 2021 goda). SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2021. T. 2. S. 161–164. (In Russian)
5. Terekhov L. D., Tvardovskaya N. V. Dynamics of internal pipeline icing in winter period when bringing it to freezing // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 402. Pp. 871–879. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_95.
6. Temperaturnyj rezhim v magistral'nykh stal'nykh truboprovodakh goryachego vodosnabzheniya pri narusheniyakh tsirkulyatsii / D. N. Kitaev [i dr.] // *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2017. No. 3 (699). S. 62–68. (In Russian)
7. Alawadhi E. M. Phase change process with free convection in a circular enclosure: numerical simulations // *Computers & Fluids*. 2004. Vol. 33 (10). Pp. 1335–1348. DOI: 10.1016/j.compfluid.2003.11.002. (In Russian)
8. Lapshin V. F. Raschet vremeni okhlazhdeniya nadzemnogo vodovoda s teploizolyatsiej v usloviyakh otritsatel'nykh temperatur // *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya*. 2024. T. 21, vyp. 1. S. 103–112. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-103–112.
9. Lapshin V. F. Simulation of cooling of aboveground water pipeline with heat insulation // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 583. P. 02022. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458302022>.
10. Martynenko O. G., Khramtsov P. P. Free-convective heat transfer. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. 518 p. DOI: 10.1007/3-540-28498-2.
11. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti*. M.: Vysshaya shkola, 1967. 600 s. (In Russian)
12. *Fizicheskie velichiny: spravochnik* / pod red. I. S. Grigor'eva, E. Z. Mejlikhova. M.: Energoatomizdat, 1991. 1232 s. (In Russian)

Received: 05.12.2025

Accepted: 04.03.2026

Author's information:

Vladimir F. LAPSHIN — Dr. Sci. of Physics and Mathematics, Professor; lapshinvf@mail.ru

УДК 621.891 + 06

Лабораторные исследования опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для сравнения трибологических свойств и ресурса к истиранию

Н. В. Зиновьев¹, П. В. Харламов², Я. К. Склифус²

¹ Донской государственный технический университет, Россия, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

² Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2

Для цитирования: Зиновьев Н. В., Харламов П. В., Склифус Я. К. Лабораторные исследования опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для сравнения трибологических свойств и ресурса к истиранию // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 196–207. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-196-207

Аннотация

Цель: исследование образцов наноструктурированного материала. В работе представлены результаты лабораторных испытаний образцов смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения для сравнения трибологических свойств и ресурса к истиранию, а также результаты проведения испытаний по температурной стойкости. **Методы:** в ходе исследований выяснилось, что существующие методы оценки трибологических характеристик смазочных материалов изначально ориентированы исключительно на жидкие и пластичные составы. **Результаты:** предложен метод оценки основных триботехнических и трибоспектральных характеристик материала, способный обеспечить высокую точность измерений с учетом приближения условий испытаний к эксплуатационным особенностям работы. **Практическая значимость:** положен задел для расширения номенклатуры и повышения качества смазочных материалов. Предложенный подход дает возможность существенно увеличить ресурс тяжело нагруженных узлов трения, снизить энергозатраты на функционирование механизмов, а также расширить температурный диапазон эффективной работы смазочных материалов, обеспечив при этом экологическую безопасность производственных процессов за счет использования доступных и безопасных компонентов.

Ключевые слова: смазочный материал, структура, концентрация компонента, поверхность трения, рецептура смазочного материала, лабораторные испытания, триботехническая пара

Введение

Эффективность, надежность и долговечность транспортных систем во многом определяются соответствующими характеристиками ключевых узлов трения, таких как гасители колебаний, контакт «колесо-рельс», тормозные механизмы, муфты сцепления, опоры качения или скольжения, зубчатые зацепления и другие.

С учетом указанных особенностей в качестве модельной системы — открытого тяжело нагруженного узла трения — для оптимизации состава наноструктурированного смазочного материала был выбран контакт «колесо-рельс», то есть взаимодействие гребня железнодорожного колеса с боковой поверхностью головки рельса.

Свойства смазочных материалов в узлах трения формируются под влиянием множества разнородных факторов. На них воздействуют как внешние условия (нагрузка, скорость движения, состав и свойства окружающей среды, температура), так и характеристики самих деталей (физико-механические свойства материалов, технология обработки поверхностей, геометрия контактирующих поверхностей), а также конструктивные особенности узла в целом.

Работоспособность смазочного материала в трибосопряжении определяется уникальным сочетанием всех этих факторов. Их многочисленность и вероятностный характер влияния в реальных условиях существенно ограничивают возможности расчетного прогнозирования свойств смазочных материалов на этапах исследования и разработки. По этой причине наиболее достоверные данные о свойствах различных смазочных материалов по-прежнему получают экспериментальным путем — в ходе натурных испытаний.

В настоящее время наиболее широко применяемым и информативным способом оценки смазывающих свойств жидких и пластичных смазочных материалов считается метод определения трибологических характеристик с использованием четырехшариковой машины. Данная методика регламентирована стандартом ГОСТ 949075.

Предлагаемый способ соответствует международным стандартам DIN 51 350 и ASTM D 2266, что обеспечивает сопоставимость результатов, полученных по отечественному стандарту, с зарубежными данными [1].

Принцип работы четырехшариковой машины трения заключается в моделировании скольжения на контактных поверхностях шариков. В установке три нижних шарика зафиксированы в чаше неподвижно, тогда как верхний шарик движется с постоянной скоростью.

В процессе испытаний нагрузка постепенно увеличивается, при этом непрерывно регистрируются величина силы трения и степень износа контактирующих поверхностей.

Анализ кривой износа дает возможность определить ряд ключевых показателей. Так, по точкам перегиба на кривой выявляют критическую нагрузку (P_k), нагрузку сваривания (P_c) и нагрузочную (несущую) способность. Индекс задира (I_z) вычисляют на основании предельного давления. Характер изнашивания и показатель износа оценивают по пятнам износа на шариках.

Зависимость износа ($D_{и}$) от нагрузки (P) графически отображается в виде кривой износа (рис. 1). Интенсивность износа на участке от начала испытаний до момента сваривания определяется противозадирными свойствами смазочного материала — его способностью минимизировать износ. Именно эта характеристика отражается в индексе задира (I_z).

На начальном этапе кривой (участок АВ) износ протекает в условиях граничного трения и находится в прямой пропорциональной зависимости от приложенной

нагрузки. В данном режиме соотношение между величиной нагрузки и степенью износа остается постоянным. Именно по этому фрагменту кривой оценивают антифрикционные и противоизносные свойства смазочного материала.

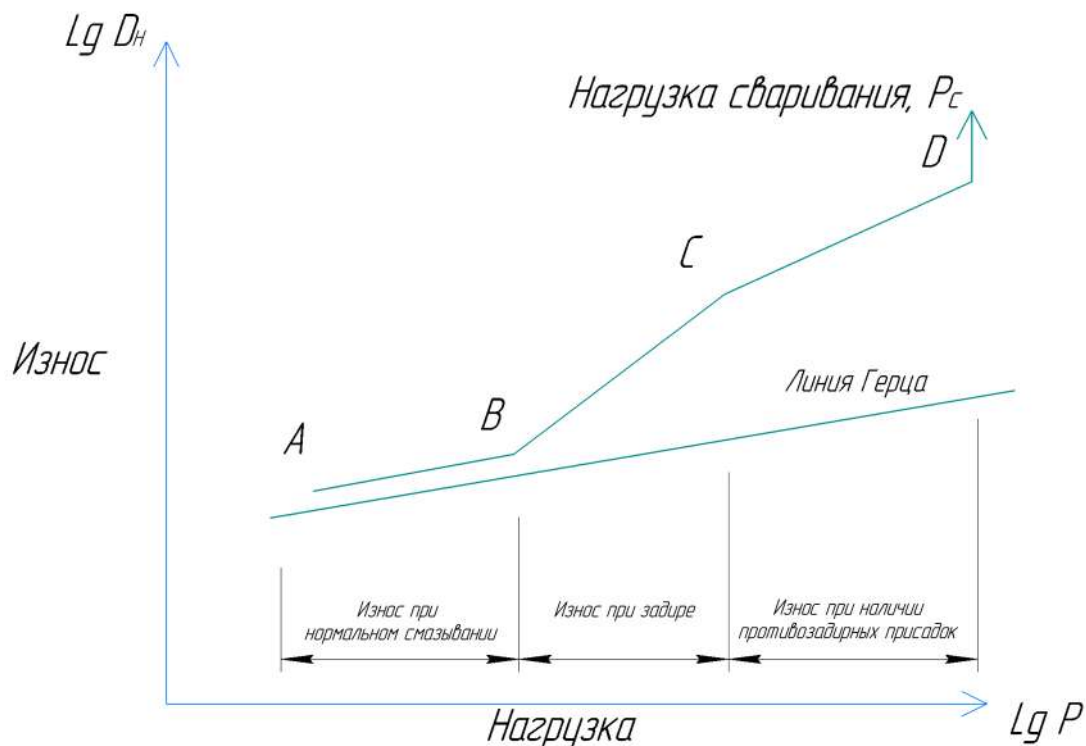


Рис. 1. Кривая износа, полученная на 4-шариковой машине трения

Критические точки износа выявляют по характерным точкам перегиба на кривой. Критическая нагрузка (P_k) — это предельное значение нагрузки, при превышении которого начинается интенсивный износ вследствие схватывания поверхностей. Такое схватывание возникает из-за разрыва смазочной пленки. Величина P_k отражает максимальную нагрузку, которую смазочный материал способен выдержать без разрушения пленки; ее также называют несущей способностью.

Нагрузка сваривания (P_c) представляет собой предельно допустимую нагрузку, при превышении которой происходит схватывание (сваривание) шаров — верхний шарик перестает вращаться и фиксируется в неподвижном положении.

На основе анализа предварительной информации и с учетом специфики эксплуатации открытых тяжело нагруженных узлов трения было установлено, что для подобных трибосистем оптимальным решением является применение наноструктурированного смазочного материала в форме твердопластичного смазочного материала покрытия (ТПСМП).

Стоит подчеркнуть, что методика оценки трибологических характеристик с использованием четырехшариковой машины разработана исключительно для

анализа смазочных свойств жидких и пластичных материалов. Данный метод не принимает во внимание специфические особенности твердых и твердопластичных смазочных покрытий, включая разрабатываемый наноструктурированный смазочный материал для открытых тяжело нагруженных узлов трения (в том числе ТПСМП) [2].

Вследствие этого до настоящего момента не существовало возможности объективно и с высокой точностью оценить эксплуатационные и трибологические характеристики такого материала, а также определить, как эти параметры влияют на эффективность его работы.

Метод оценки основных триботехнических и трибоспектральных характеристик

Для решения задачи оценки триботехнических характеристик твердых и твердопластичных смазочных материалов, а также для анализа стойкости колесных пар при их применении потребовалось разработать новые подходы и методики.

В результате был создан метод оценки основных триботехнических и трибоспектральных характеристик, основанный на современных способах неразрушающего контроля, динамического мониторинга и компьютерных технологий. Суть метода заключается в определении и оценке ключевых трибологических параметров смазочных материалов при смазывании рабочих поверхностей открытых узлов трения в конкретных механических системах.

Аппаратура и материалы

Для оценки эффективности Т и ТПСМП применялся метод анализа трибологических и трибоспектральных характеристик с использованием специализированного оборудования.

Основным инструментом для моделирования контакта гребня колеса с боковой поверхностью головки рельса служит роликовая аналогия, принцип работы которой основан на эффекте проскальзывания. Главное преимущество такого инструмента — программная имитация скольжения, позволяющая приблизить эксперимент к реальным условиям. На текущий момент реализовать такой вид управляемого взаимодействия возможно на машине трения Amsler. При этом становится возможным создавать условия от чистого качения до полного скольжения роликов, что позволяет воспроизводить различные виды узлов трения. Оборудование универсально: оно совместимо со всеми типами смазочных материалов (от жидких до твердых) и поддерживает разные способы их нанесения, включая ротационный, аккумулятивно-ротационный, капельный и разовый.

Комплекс измерительной аппаратуры обеспечивает непрерывный мониторинг ключевых параметров процесса: отслеживает изменения момента трения

и температуры в зоне контакта, фиксирует линейный износ образцов и переходное сопротивление контакта.

В ходе лабораторных исследований наноструктурированного смазочного материала для оценки трибологических характеристик и ресурса к истиранию использовалась установка 2070 СМТ-1. Ее кинематическая схема представлена на рис. 2 и содержит все ключевые узлы машины, вовлеченные в процесс имитации трибологического контакта. Из схемы видно, что данный механизм способен прикладывать регулируемое усилие, задающееся осью-винтом, при этом диапазон усилия варьируется в 10 раз.

Из контрольно-измерительной аппаратуры машина содержит в себе датчик усилия крутящего момента, линейный датчик силы для регистрации прилагаемой нагрузки и непосредственно датчик угловой скорости. Данные устройства минимизируют погрешность измерений, позволяя достаточно точно оценить комплексные параметры.

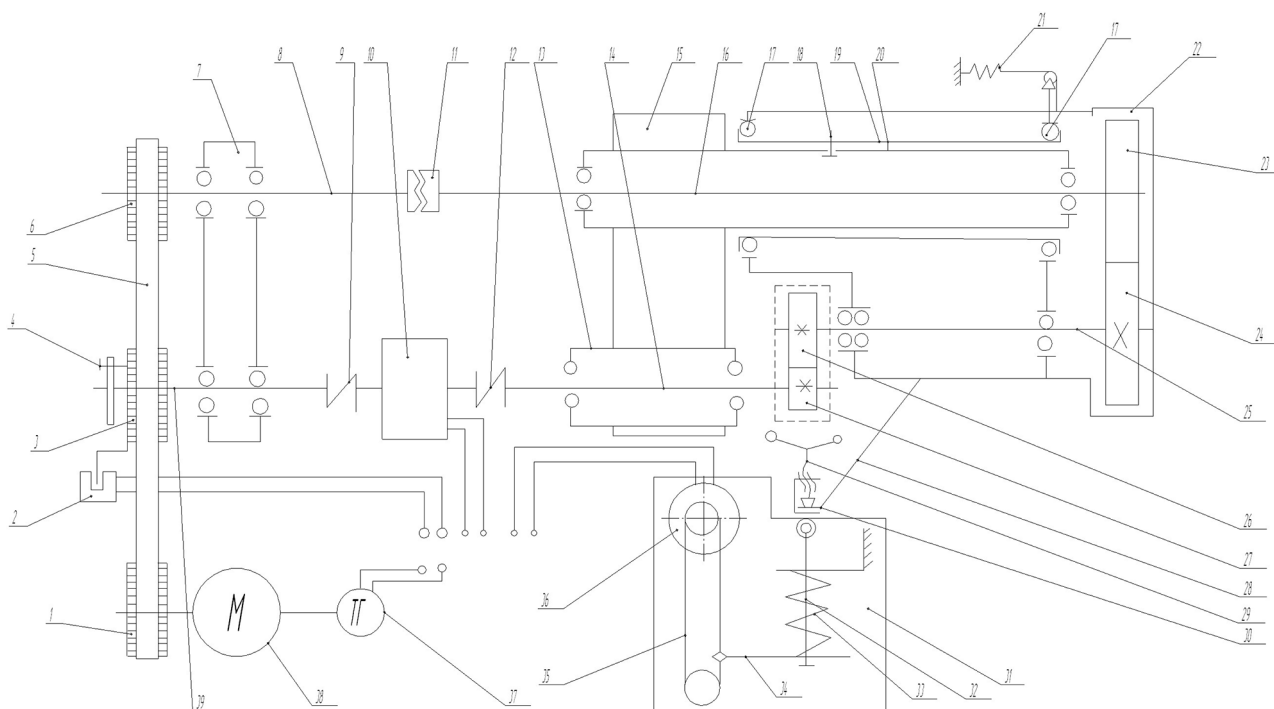


Рис. 2. Кинематическая схема машины 2070 СМТ-1

В процессе испытаний измеритель момента трения в режиме статического нагружения обеспечивает высокую точность: допустимое среднеквадратическое отклонение случайной составляющей приведенной погрешности не превышает 1%. Фиксация числа циклов вращения нижнего образца выполняется с помощью бесконтактного выключателя — датчика числа циклов 2.

Величина проскальзывания между роликами при условии, что радиус роликов идентичен, выполняется путем изменения диаметра приводного шкива (6).

Регулировка угловой скорости вращения нижнего образца достигается заменой шкива (1), а точная настройка в заданных пределах реализуется посредством электродвигателя (38).

Система поддерживает два диапазона измерения частоты вращения вала нижнего образца. При этом предельно допустимая погрешность измерителя частоты вращения сохраняется в пределах $\pm 3\%$.

Для сбора и обработки экспериментальных данных применяется автоматизированная система. Она объединяет персональный компьютер типа IBM/PC с усиливающим устройством датчика уровня вибрации, имеющим синхронизацию. Функционирование комплекса обеспечивается соединительными кабелями, источником питания и специализированным программным обеспечением.

Для оценки эффективности твердых (Т) и твердопластичных смазочных материалов покрытий (ТПСМП) согласно методу анализа трибологических и трибоспектральных характеристик рекомендуются испытания по схемам «ролик-ролик» и «ролик-звездочка».

В рамках лабораторных исследований опытных образцов наноструктурированного смазочного материала из колесной и рельсовой стали были изготовлены роликовые образцы трения. Эти образцы моделируют колесо и рельс соответственно и созданы с учетом геометрических параметров, полученных в ходе физико-математического моделирования (рис. 3).

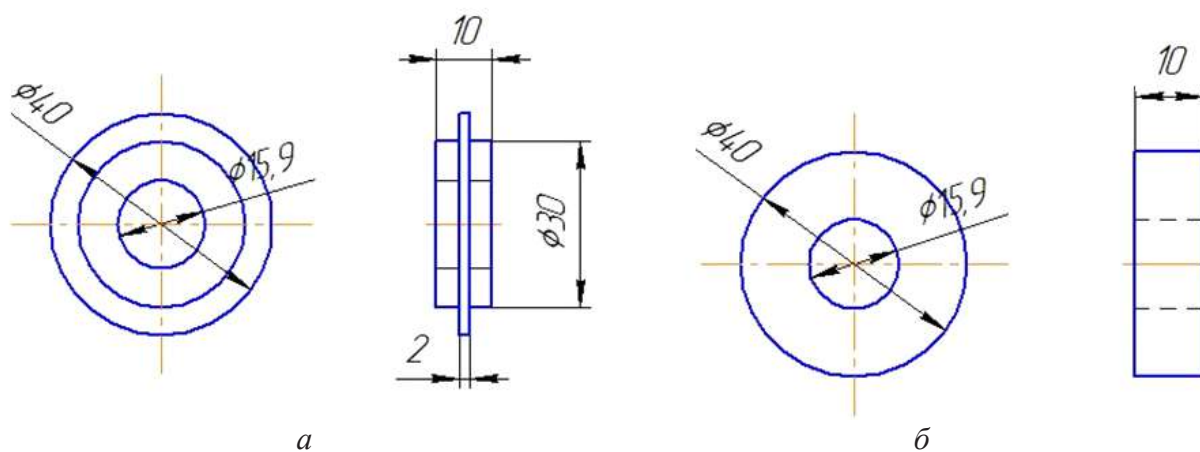


Рис. 3. Роликовые образцы трения, *а* — модель колеса, *б* — модель рельса

Для проведения взвешивания применялись электронные весы моделей WA35 и ВЛК500 г.

Для удаления избыточного объема твердого (Т) и твердопластичного смазочного материалопокрытия (ТПСМП), выдавленного в процессе испытаний с поверхностей верхнего и нижнего роликовых образцов, используются шпатели под номерами 1 и 2 соответственно.

Для удаления загрязнений и остатков смазочного материала с роликовых образцов использовали растворитель Нефрас марки СЗ 80/120 (БР1 «Галоша»), после применения которого на образцах отсутствует проявление характерной масляной пленки.

Опытные образцы наноструктурированного смазочного материала, предназначенные для открытых тяжело нагруженных узлов трения, были изготовлены в виде цилиндров (стержней) с геометрическими параметрами: длина — 110 мм, диаметр — 20 мм. Всего изготовлено 27 образцов с варьируемым содержанием компонентов.

Подготовительный этап

Перед началом испытаний твердых (Т) и твердопластичных смазочных материалов покрытий (ТПСМП) все детали, контактирующие с ними, подлежат тщательной очистке. Процедура осуществляется следующим образом:

1. Детали промывают несколькими (3–5) порциями растворителя или иного аналогичного средства, обладающего высокой растворяющей способностью по отношению к Т и ТПСМП. Растворитель эффективно удаляет как поверхностные загрязнения, так и остаточные слои смазочных материалов.

2. Промывку продолжают до полного осветления растворителя, что свидетельствует об удалении всех загрязнений. Каждую последующую порцию растворителя используют только после того, как предыдущая стала визуально прозрачной.

3. После завершения промывки детали размещают в хорошо проветриваемом месте и оставляют для естественной просушки на открытом воздухе. Сушку проводят до полного испарения растворителя и достижения комнатной температуры поверхности деталей.

4. Контроль качества очистки осуществляют визуально: на поверхностях не должно оставаться следов загрязнений, разводов или масляных пятен.

Проведение испытаний

В процессе испытаний наноструктурированный смазочный материал (Т и ТПСМП) распределяют по контуру, имитирующему гребень колеса (верхний ролик). Нанесение выполняют методом натирания.

При этом нагрузочные и скоростные параметры (PV) устанавливают в строгом соответствии с разделами а–г специально разработанного метода оценки трибологических и трибоспектральных характеристик. При задании параметров учитывают константы подобия, которые были получены в ходе физико-математического моделирования.

Для лабораторных исследований опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения предвари-

тельно определены ключевые параметры: нагрузка составляет 1000 Н, контактное давление — 1,32 ГПа, средняя частота оборотов — 300 об/мин.

Испытания выполняются серией отдельных определений — для каждого задействуют свежую пробу исследуемого Т и ТПСМП и новые роликовые образцы. В ходе исследования идет постоянная регистрация крутящего момента, производится регистрация коэффициента трения расчетным методом, а также ведется регистрация скорости вращения образцов.

При приближении к значениям коэффициента сухого трения принимают момент полного истирания смазочного покрытия. Здесь характерны проявления первичных признаков износа. Показатель стойкости к истиранию вычисляют как среднее арифметическое значение по результатам не менее трех экспериментов.

Важнейшим аспектом испытаний на истираемость является определение оптимального объема смазочного материала, наносимого на образец, поскольку эта величина напрямую влияет на оценку его расхода в реальных условиях эксплуатации. Экспериментальные данные свидетельствуют о наличии четко определенных физических условий, формирующих толщину невыдавливаемого слоя смазочного материала. Именно эта толщина определяет работоспособность материала после однократного нанесения. В рамках применяемого метода предусмотрен контроль количества смазочного материала как при его нанесении, так и в процессе проведения испытаний.

Метод оценки основных триботехнических и трибоспектральных характеристик реализуется посредством последовательности следующих действий:

1. Исследуемые роликовые образцы подвергают взвешиванию с использованием электронных весов. Затем подготовленные образцы монтируют на машину трения типа Amsler.

2. На вращающийся верхний роликовый цилиндрический образец, который имитирует гребень колеса, наносят Т и ТПСМП методом натирания. После этого проводят повторное взвешивание роликовых образцов — это позволяет точно установить массу нанесенного смазочного материала.

3. Обработанные образцы вновь устанавливают на машину трения Amsler. На следующем этапе к ним прикладывают нагрузку и в течение 10 секунд выполняют приработку Т и ТПСМП.

4. В завершение из зоны фрикционного взаимодействия удаляют излишки смазочного материала.

5. Исследуемые образцы взвешивают на электронных весах. Это позволяет определить массу невыдавленного объема Т и ТПСМП после его однократного нанесения на роликовые образцы.

6. Образцы вновь устанавливают на машину трения. На этом этапе проводят испытания, в ходе которых определяют триботехнические и трибоспектральные характеристики материала, а также оценивают ресурс невыдавленного объема смазочного материала при его разовом нанесении.

Для проведения испытаний с регулированием температуры окружающей среды активируют криокамеру. После того как внутри камеры установится требуемая температура, запускают привод машины трения. При этом выбирают режим, который обеспечивает заданные параметры — либо скорость качения, либо скорость скольжения, либо их комбинацию. Лишь после этого к образцам прикладывают необходимую нагрузку [4].

Результаты лабораторных исследований опытных образцов

В рамках разработанной методики были выполнены лабораторные исследования 27 опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения. Основанием для проведения экспериментов послужили численные значения нагрузочно-скоростных параметров, полученные при физико-математическом моделировании как натурального, так и модельного объектов. В ходе исследований осуществлялось сопоставление трибологических характеристик материалов и оценивался их ресурс к истиранию.

Выводы

В процессе исследований установлено, что современные методы оценки трибологических характеристик смазочных материалов имеют ограниченную область применения. Их разрабатывали исключительно для жидких и пластичных составов, поэтому они не учитывают особенности твердых и твердопластичных смазочных покрытий.

В частности, существующие методики оказались неприменимы для достоверной оценки эффективности наноструктурированного материала, предназначенного для открытых тяжело нагруженных узлов трения. Это создает существенные ограничения при исследовании и внедрении смазочных материалов нового класса.

Для устранения этого пробела был создан метод оценки трибологических и трибоспектральных характеристик. Он дает возможность объективно оценивать эффективность смазочных материалов в любом агрегатном состоянии — жидком, пластичном, твердопластичном, твердом или в форме покрытий. Метод обеспечивает высокую точность измерений и позволяет максимально приблизить условия испытаний к реальным эксплуатационным режимам.

Внедрение данного метода открывает перспективы для расширения номенклатуры смазочных материалов и повышения их качественных показателей.

В рамках исследования были проведены лабораторные испытания опытных образцов смазочных материалов. В ходе экспериментов осуществлялось сравнение трибологических характеристик, ресурса стойкости к истиранию и температурной стойкости. Полученные данные послужат основой для оптимизации состава разрабатываемого наноструктурированного смазочного материала.

Список источников

1. Повышение эффективности фрикционной системы «колесо — рельс» / В. В. Шаповалов [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2019. Т. 78, № 3. С. 177–182. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182.
2. Майба И. А., Глазунов Д. В. Особенности механизма взаимодействия системы «гребень колеса — боковая грань рельса» в кривой пути // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 6. С. 14–18.
3. Харламов П. В. Мониторинг изменений упруго-диссипативных характеристик для решения задач по исследованию трибологических процессов в системе «железнодорожный путь — подвижной состав» // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1 (81). С. 122–129. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_1_122.
4. Способ модифицирования систем термоплакирования стальных поверхностей трения: патент РФ № RU 2750585 С1. В61К 3/02, № 2020134704 / В. В. Шаповалов [и др.]; заявл. 21.10.2020; опубл. 29.06.2021.
5. Kolesnikov V. I., Ozyabkin A. L., Novikov E. S. Friction wear, and monitoring of heavily loaded tribosystems: an innovative approach to studying the processes // Journal of Friction and Wear. 2019. P. 292–302. DOI: 10.3103/S1068366619040056.
6. Майба И. А., Никитин Е. И., Никитина М. И. Моделирование поведения смазочных материалов при граничном трении методом молекулярной динамики // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2019. № 2 (74). С. 29–36.
7. Хуссеин Хайдар А. Твердые композиционные присадки на основе металлизированного графита для пластичных смазочных материалов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / Институт проблем машиноведения РАН. Иваново, 2009. 156 с.
8. Dumitriu M. Modeling of railway vehicles for virtual homologation from dynamic behavior perspective // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 371. P. 647–651. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.371.647.
9. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980. 228 с.
10. Программа и методики исследования свойств модифицированного покрытия поверхности трибоконтакта ПП.0203.001-ПМ, ФГБОУ ВО РГУПС, утверждено 24.12.2018. Ростов-на-Дону, 2018. 20 с.
11. Wolter K. U., Zacher M., Slovak B. Correlation between track geometry quality and vehicle reactions in the virtual rolling stock homologation process // 9th World Congress on Railway Research. 2011. May 22–26.

Дата поступления: 27.01.2026

Решение о публикации: 01.03.2026

Контактная информация:

ЗИНОВЬЕВ Никита Владимирович — инженер 1-й категории Донского инжинирингового центра; inbox@n-zinovev.ru

ХАРЛАМОВ Павел Викторович — д-р техн. наук, доцент; kcharlamov@yandex.ru

СКЛИФУС Ярослав Константинович — канд. техн. наук, доцент; icnps@rgups.ru

Laboratory studies of prototype nanostructured lubricants for comparison of tribological properties and abrasion resistance

N. V. Zinoviev¹, P. V. Kharlamov², Ya. K. Sklifus²

¹ Don State Technical University, 1 Gagarina sq., 344000, Rostov-on-Don, Russia

² Rostov State University of Communications, 2 Rostov Infantry Regiment sq., 344038, Rostov-on-Don, Russia

For citation: *Zinoviev N. V., Kharlamov P. V., Sklifus Ya. K. Laboratory studies of prototype nanostructured lubricants for comparison of tribological properties and abrasion resistance // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 196–207. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-196-207. (In Russian)*

Abstract

Objective: to investigate samples of nanostructured material. This paper presents the results of laboratory tests of lubricant samples designed for open, heavy-duty friction units, aiming to compare tribological properties and abrasion resistance, as well as the results of thermal stability tests. **Methods:** in the course of research, it was established that the existing methods for assessing the tribological characteristics of lubricants are primarily oriented exclusively toward liquid and plastic compositions. **Results:** a method has been proposed for evaluating the fundamental tribotechnical and tribospectral characteristics of the material, capable of ensuring high measurement accuracy while approximating test conditions to the operational specificities of performance. **Practical significance:** a foundation has been laid for expanding the nomenclature and enhancing the quality of lubricants. The proposed approach offers the possibility of significantly increasing the service life of heavy-duty friction units, reducing energy consumption for mechanism operation, and extending the temperature range for the efficient performance of lubricants, while simultaneously ensuring the environmental safety of production processes through the use of accessible and safe components.

Keywords: lubricant, structure, component concentration, friction surface, lubricant formulation, laboratory tests, tribotechnical pair

References

1. Povyshenie effektivnosti friktsionnoj sistemy “koleso — rel’s” / V. V. Shapovalov [i dr.] // Vestnik Nauchno-issledovatel’skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. 2019. T. 78, no. 3. S. 177–182. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182. (In Russian)

2. Majba I. A., Glazunov D. V. Osobennosti mekhanizma vzaimodejstviya sistemy “greben’ kolesa — bokovaya gran’ rel’sa” v krivoj puti // Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh. 2015. No. 6. S. 14–18. (In Russian)

3. Kharlamov P. V. Monitoring izmenenij uprugo-dissipativnykh kharakteristik dlya resheniya zadach po issledovaniyu tribologicheskikh protsessov v sisteme “zheleznodorozhnyj put’ —

podvizhnoj sostav” // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2021. No. 1 (81). S. 122–129. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_1_122. (In Russian)

4. Sposob modifitsirovaniya sistem termoplakirovaniya stal’nykh poverkhnostej treniya: patent RF № RU 2750585 C1. B61K 3/02, № 2020134704 / V.V. Shapovalov [i dr.]; zayavl. 21.10.2020; opubl. 29.06.2021. (In Russian)

5. Kolesnikov V.I., Ozyabkin A.L., Novikov E.S. Friction, Wear and monitoring of heavily loaded tribosystems: an innovative approach to studying the processes // Journal of Friction and Wear. 2019. P. 292–302. DOI: 10.3103/S1068366619040056.

6. Majba I.A., Nikitin E.I., Nikitina M.I. Modelirovanie povedeniya smazochnykh materialov pri granichnom trenii metodom molekulyarnoj dinamiki // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2019. No. 2 (74). S. 29–36. (In Russian)

7. Khussein Khajdar A. Tverdye kompozitsionnye prisadki na osnove metallizirovannogo grafita dlya plastichnykh smazochnykh materialov: diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.04 / Institut problem mashinovedeniya RAN. Ivanovo, 2009. 156 s. (In Russian)

8. Dumitriu M. Modeling of railway vehicles for virtual homologation from dynamic behavior perspective // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 371. P. 647–651. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.371.647.

9. Evdokimov Yu.A., Kolesnikov V.I., Teterin A.I. Planirovanie i analiz eksperimentov pri reshenii zadach treniya i iznosa. M.: Nauka, 1980. 228 s. (In Russian)

10. Programma i metodiki issledovaniya svoystv modifitsirovannogo pokrytiya poverkhnosti tribokontakta PP.0203.001-PM, FGBOU VO RGUPS, utverzhdeno 24.12.2018. Rostov-na-Donu, 2018. 20 s. (In Russian)

11. Wolter K.U., Zacher M., Slovak B. Correlation between track geometry quality and vehicle reactions in the virtual rolling stock homologation process // 9th World Congress on Railway Research. 2011. May 22–26.

Received: 27.01.2026

Accepted: 01.03.2026

Author’s information:

Nikita V. ZINOVEV — Category 1 Engineer of the Don Engineering Center; inbox@n-zinovev.ru

Pavel V. KHARLAMOV — Dr. Sci. of Engineering, Associate Professor; kcharlamov@yandex.ru

Yaroslav K. SKLIFUS — PhD in Engineering, Associate Professor; icnps@rgups.ru

УДК 339.138

Оптимизация управления цепочками создания ценности на основе системы аудита поставщиков

Л. Ф. Казанская¹, А. Н. Федорова¹, Ю. И. Макаров¹, И. А. Латыпова²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² Набережночелнинский институт (филиал) Казанского федерального университета (КФУ), Россия, 423800, Республика Татарстан, Набережные Челны, пр. Мира, 13

Для цитирования: Казанская Л. Ф., Федорова А. Н., Макаров Ю. И., Латыпова И. А. Оптимизация управления цепочками создания ценности на основе системы аудита поставщиков // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 208–217. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-208-217

Аннотация

Научная статья посвящена исследованию функциональной роли аудита поставщиков в системе управления цепочками создания ценности. **Цель:** разработка методов аудита поставщиков как инструментария управления цепочками создания ценности, включающей формализованные критерии отбора и систему оценочных показателей. **Методы:** в исследовании использованы методы обобщения на основе сравнительного и статистического анализа, методы логического построения и сопутствующих изменений. **Результаты:** определены функциональная роль и место аудиторской деятельности в системе управления цепочками создания ценности; структурированы и ранжированы критерии для проведения селекции контрагентов; разработаны системы ключевых индикаторов, позволяющих количественно оценивать результативность взаимодействия с поставщиками; представлен процессный алгоритм проведения аудиторских проверок. В работе проведен детальный анализ процессуальных этапов аудиторской проверки, осуществлена систематизация оценочных критериев для селекции контрагентов и разработана система индикаторов для оценки эффективности аудиторской деятельности. Особое внимание уделено методике обоснования интеграции аудиторских процедур в стратегическом управлении снабженческой деятельностью. **Практическая значимость:** на основе комплексного изучения современных управленческих практик сформулирован ряд практических рекомендаций, направленных на оптимизацию процессов аудита поставщиков в контексте цифровой трансформации бизнес-моделей. Обоснована практическая целесообразность внедрения предлагаемой системы аудита. Предложенные решения учитывают необходимость повышения адаптивности системы управления цепочками создания ценности к изменяющимся условиям внешней среды.

Ключевые слова: аудит контрагентов, цепочки создания ценности, управление закупочной деятельностью, оценка надежности поставщиков, контроль качества, управление рисками

Введение

В контексте усиления мировых интеграционных процессов и усложнения архитектуры цепочек поставок существенно повышается значимость эффективного управления взаимоотношениями с контрагентами [1]. Аудит поставщиков позиционируется в качестве ключевого элемента обеспечения устойчивости и надежности цепочек создания ценности, выполняя следующие системообразующие функции [2]:

- снижение уровня операционных рисков;
- обеспечение соответствия качества сырья и компонентов установленным стандартам;
- оптимизация расходов в сфере закупочной деятельности;
- повышение степени прозрачности снабженческих процессов.

Научный и практический интерес к данной проблематике детерминирован комплексом факторов, характеризующих современную бизнес-среду: интенсификацией конкурентной борьбы, предопределяющей необходимость сокращения издержек; усложнением конфигурации логистических сетей; обязательностью строгого соблюдения нормативно-правовых требований, а также активным внедрением цифровых технологий в систему управления поставками [3].

Целью настоящего исследования является разработка методов аудита поставщиков как инструментария управления цепочками создания ценности, включающей формализованные критерии отбора и систему оценочных показателей. Для достижения поставленной цели решается следующий комплекс задач:

1. Определение функциональной роли и места аудиторской деятельности в системе управления цепочками создания ценности.
2. Структуризация и ранжирование критериев для проведения селекции контрагентов.
3. Разработка системы ключевых индикаторов, позволяющих количественно оценивать результативность взаимодействия с поставщиками.
4. Формализация процессного алгоритма проведения аудиторских проверок.
5. Обоснование практической целесообразности внедрения предлагаемой системы аудита.

Методы и материалы

В исследовании использованы методы обобщения на основе сравнительного и статистического анализа, методы логического построения и сопутствующих изменений.

Материалами для исследования явились данные федеральных ресурсов и научные статьи российских и зарубежных ученых.

Результаты

В контексте управления цепочками создания ценности концептуальной основой исследования выступает модель М. Портера, представляющая ценностную цепочку как систему взаимосвязанных активностей, направленных на формирование конкурентных преимуществ компании [4]. Данная модель структурно дифференцирована на первичные виды деятельности, непосредственно создающие потребительскую ценность (входящая и исходящая логистика, производственные операции, маркетинг и сервис), и поддерживающие функции, обеспечивающие их эффективное выполнение (управление закупками, технологическое развитие, кадровая политика и корпоративная инфраструктура) [5]. Влияние аудита поставщиков на компоненты цепочки создания ценности представлено в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Влияние аудита поставщиков на компоненты цепочки создания ценности*

Сфера воздействия	Объекты аудиторской оценки	Эффекты для цепочки создания ценности
Стоимостные параметры	Ценовая политика контрагентов, структура затрат, скрытые издержки	Снижение себестоимости, повышение рентабельности
Временные параметры	Производственные мощности, системы планирования, резервные возможности	Минимизация рисков срывов поставок, оптимизация производственных циклов
Качественные показатели	Системы менеджмента качества, метрологическое обеспечение, механизмы предотвращения дефектов	Повышение качества конечной продукции, снижение брака
Репутационная составляющая	Соответствие экологическим стандартам, этическим нормам, требованиям устойчивого развития	Укрепление бренда, повышение инвестиционной привлекательности

* Составлено авторами.

Аудит поставщиков занимает стратегически важное положение в данной системе, организационно относясь к сфере входящей логистики, но функционально интегрируясь с процессом закупок [6]. Его системообразующая роль проявляется через многоплановое воздействие на ключевые параметры цепочки ценности. В области стоимостных характеристик аудиторская деятельность позволяет анализировать ценовую политику контрагентов, выявлять скрытые издержки и оценивать потенциал долгосрочной оптимизации затрат [7]. Что касается временных параметров, осуществляется оценка производственных мощностей, систем планирования и резервных возможностей поставщиков для минимизации рисков нарушений графика поставок [8].

Качественный аспект охватывает верификацию систем менеджмента качества, метрологического обеспечения и механизмов предотвращения дефектов. Особое значение приобретает репутационная составляющая, включающая аудит соответствия экологическим стандартам, этическим нормам и требованиям устойчивого развития [9]. Стратегические цели аудиторской деятельности эволюционируют от традиционного контроля выполнения контрактных обязательств к комплексной оценке рисков (финансовых, операционных, логистических) и выявлению возможностей для создания синергетического эффекта через совместные проекты оптимизации.

Современная парадигма управления цепочками поставок демонстрирует трансформацию аудита из инструмента ретроспективного контроля в механизм проактивного стратегического партнерства [10]. Данная метаморфоза обусловлена усложнением глобальных логистических сетей, ужесточением требований к устойчивости бизнеса и цифровой трансформацией процессов управления. Современные подходы предполагают смещение акцента с идентификации дефектов на превентивное решение проблем и взаимное развитие, что находит практическое выражение в использовании технологий больших данных и блокчейна для повышения прозрачности цепочек поставок.

Таким образом, аудит поставщиков преобразуется в ключевой элемент управления цепочкой создания ценности, выполняющий не только защитные функции, но и способствующий генерации дополнительной ценности через углубление сотрудничества с контрагентами.

Оптимизация распределения ресурсов в системе аудита поставщиков требует применения селективного подхода, предполагающего концентрацию усилий на наиболее значимых контрагентах. Ключевым аспектом при формировании программы аудита становится разработка системы критериев приоритизации, позволяющей идентифицировать поставщиков, подлежащих обязательной проверке.

Первостепенное значение приобретает критерий долевого участия в общем объеме закупок. Для количественной оценки данного параметра применяется формула:

$$D_i = \frac{V_i}{\sum_{j=1}^n V_j} \cdot 100\%,$$

где D_i — доля поставщика i в общем объеме закупок (в %);

V_i — объем закупок у поставщика i за анализируемый период;

$\sum_{j=1}^n V_j$ — суммарный объем закупок у всех поставщиков за тот же период;

n — общее количество поставщиков.

Практика показывает, что контрагенты с долей, превышающей 10%, относятся к категории стратегически значимых, поскольку их нестабильность может оказать критическое воздействие на производственную непрерывность.

Не менее важным является критерий критичности поставляемых материалов, который учитывает потенциальное влияние на качественные характеристики конечной продукции или обеспечение бесперебойности технологических процессов. В данную категорию включаются поставщики сырья, определяющего ключевые потребительские свойства продукции, поставщики длинноцикловых комплектующих, а также провайдеры критических услуг, таких как энергоснабжение и техническое обслуживание оборудования.

Существенную роль в системе отбора играет анализ исторической надежности контрагентов. Для объективной оценки используются метрики, включающие процент бракованной продукции, частоту нарушений сроков поставки и количество зафиксированных рекламаций. Систематическое превышение установленных нормативов по данным показателям свидетельствует о необходимости проведения углубленного аудита.

Географический фактор представляет собой самостоятельный критерий приоритизации, поскольку удаленность поставщика и региональные особенности могут существенно увеличивать логистические риски. К числу значимых факторов относятся политическая нестабильность, климатические условия, состояние транспортной инфраструктуры и валютные колебания.

Особую категорию составляют поставщики, работающие в регулируемых отраслях, где проведение аудита обусловлено законодательными требованиями. К таким отраслям относятся фармацевтическая промышленность, авиастроение, пищевая промышленность и ядерная энергетика, где обеспечение соответствия отраслевым стандартам является обязательным условием деятельности.

Интегральная оценка приоритетности аудита предполагает применение скоринговой системы, учитывающей взвешенное сочетание всех перечисленных критериев. Комплексный подход к формированию перечня проверяемых контрагентов позволяет оптимально распределить аудиторские ресурсы, сконцентрировав усилия на направлениях с наибольшим потенциалом риска и значимости для бизнеса.

Дискуссия

Для комплексной оценки результативности аудиторской деятельности следует учитывать систему ключевых показателей в таких взаимосвязанных направлениях, как логистика, экономический блок, система управления рисками, социальные и экологические параметры.

Немаловажную роль играет и многомерная оценка надежности контрагентов, способствующая развитию партнерских отношений, что позволит учиты-

вать количество реализованных совместных проектов по оптимизации, уровень удовлетворенности поставщиков, измеряемый через регулярное анкетирование, и доля контрагентов, прошедших внутреннюю сертификацию. Данные показатели отражают переход от контролирующей функции аудита к стратегическому партнерству, что является характерной чертой современной парадигмы управления цепочками поставок.

Интеграция показателей в единую систему мониторинга позволяет не только оценить текущую эффективность аудиторской деятельности, но и выявить направления для совершенствования взаимодействия с контрагентами, обеспечивая тем самым устойчивое развитие всей цепочки создания стоимости.

Оптимизация системы аудита поставщиков требует внедрения дифференцированного подхода к периодичности проверок, основанного на категоризации контрагентов по степени их влияния на бизнес-процессы. Для стратегически значимых поставщиков, характеризующихся критичностью поставляемых компонентов и высокими объемами сотрудничества, устанавливается ежегодный цикл комплексных выездных проверок с участием межфункциональных экспертных групп. В отношении второстепенных контрагентов применяется мониторинг с периодичностью раз в 2–3 года, при этом особое внимание уделяется триггерам для внепланового аудита, включающего рекламации, изменения контрактных условий или сигналы о финансовой нестабильности. На этапе первоначальной квалификации новых партнеров осуществляется обязательный предконтрактный аудит с последующим усиленным мониторингом в течение стартового периода сотрудничества. Подходы к организации аудита различных категорий поставщиков представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Подходы к организации аудита различных категорий поставщиков*

Категория поставщика	Периодичность контроля	Формат проведения	Критерии для внеплановой проверки
Стратегически значимые	Ежегодно	Выездная проверка межфункциональной группой	Систематические нарушения условий контракта
Второстепенные	Раз в 2–3 года	Дистанционный аудит, выборочные проверки	Жалобы от подразделений, изменение контрактных условий
Новые партнеры	Предконтрактный аудит + усиленный мониторинг в первый год	Полная предварительная проверка	Отклонения в ходе начального периода сотрудничества

* Составлено авторами.

Современная методология аудиторской деятельности предполагает активную интеграцию цифровых решений, в частности ERP-систем, обеспечивающих мониторинг ключевых показателей эффективности в режиме реального времени. Автоматизации подлежат процессы сбора данных о соблюдении сроков поставок, качестве продукции и логистических затратах, а также формирование стандартизированных отчетов и управление корректирующими действиями. Дополнительный аналитический потенциал реализуется через применение BI-инструментов для обработки массивов данных и систем электронного документооборота для централизованного хранения сопроводительной документации.

Эффективность аудиторской системы значительно повышается при ее органичной интеграции с общекорпоративными процессами управления рисками, где особую актуальность приобретает оценка поставщиков по матрице «вероятность-воздействие» и разработка превентивных мер. Синергетический эффект достигается за счет согласования аудиторских процедур с требованиями системы менеджмента качества и принципами устойчивого развития, что предполагает включение ESG-критериев в оценочные методики.

Важным элементом развития партнерских отношений являются регулярные совещания с ключевыми контрагентами, в рамках которых осуществляется анализ результатов аудитов, обсуждаются показатели эффективности и определяются перспективные направления кооперации. Институционализация взаимодействия подкрепляется внедрением программ развития поставщиков, систем мотивации и специализированных платформ для обмена данными.

Ключевыми индикаторами результативности модернизированной системы аудита выступают сокращение критических несоответствий не менее чем на 20% в годовом исчислении, увеличение доли поставщиков до 60% и снижение временных затрат на подготовку отчетности на 30% благодаря автоматизации процессов. Реализация указанных мер способствует формированию устойчивой и прозрачной цепи поставок, соответствующей стратегическим целям развития организации.

Заключение

Аудит поставщиков представляет собой не разовое контрольное мероприятие, а непрерывный управленческий процесс, интегрированный в систему управления цепочкой создания стоимости. Эффективность данного процесса детерминруется тремя фундаментальными факторами: строгой формализацией критериев селекции контрагентов, системным применением сбалансированных показателей результативности и активным вовлечением поставщиков в программы совместной оптимизации.

Внедрение предложенной методологической платформы демонстрирует значимые практические результаты: снижение уровня операционных рисков на 20–30%, сокращение затрат в закупочной деятельности на 5–15% и повышение

качественных характеристик конечной продукции на 10–25 %. Полученные количественные показатели подтверждают гипотезу о стратегической значимости аудиторской деятельности для создания добавленной стоимости.

Перспективы научного поиска в данной области связаны с разработкой специализированных цифровых решений, включая системы распределенного реестра для обеспечения неизменности аудиторских данных и алгоритмы машинного обучения для прогнозной аналитики рисков. Параллельно предполагается осуществление работ по отраслевой адаптации критериев аудиторской оценки с учетом специфики таких секторов экономики, как информационные технологии, строительный комплекс и сфера розничной торговли.

Список источников

1. Кириллова Е. А., Штемпель А. Н. Критерии оценки и выбора поставщиков радиоэлектронных компонентов // *Управленческий учет*. 2024. № 2. С. 275–281.
2. Абдикеева Н. М., Тютюкина Е. Б., Богачев Ю. С. Формирование цепочек воспроизводства добавленной стоимости в промышленности на основе бизнес-аудита // *Экономика и управление*. 2019. Т. 12, № 3. С. 68–76. DOI: 10.26794/1999-849X2019-12-3-68-76.
3. Мамедов Н. Г. Ключевые показатели эффективности в управлении цепочками поставок: сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции «Механизм реализации стратегии социально-экономического развития государства» / под ред. А. М. Эсетовой. Махачкала, 2022. С. 177–180. EDN: DEWQLO.
4. Портер М. Конкурентное преимущество: как достичь высокого результата и обеспечить его устойчивость. М.: Альпина Паблишер, 2018. 715 с.
5. Барсуков А. П. Структура цепочек создания ценности, ориентированных на идентифицируемые компаниями-производителями целевые группы покупателей молочной продукции // *Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии*. 2018. № 2 (61). С. 15–21. EDN: YQVCAR.
6. Мариничев В. А. Концепция управления, нацеленная на создание цепочки ценности, и механизм ее реализации // *Вопросы экономики и права*. 2015. № 8. С. 93–97.
7. Cheraghi S. H., Dadashzaden M., Subramanian M. Critical factors for supplier selection: an update // *Journal of Applied Business Research*. 2004. Iss. 20 (2). Pp. 91–108. DOI: 10.19030/jabr.v20i2.2209.
8. Управление рисками в логистике: монография / В. Л. Темнов [и др.]. М.: ТрансЛит, 2019. 274 с.
9. Токарев В. В. Оценка поставщиков для совершенствования управления цепочками поставок на примере атомной промышленности: дисс. ... канд. техн. наук. 2020. 211 с.
10. Adeleye E. O. Investigating the impact of organization structure on the performance of the nigerian securities and exchange commission (NSEC) // *European Journal of Business and Management*. 2016. Vol. 8, no. 15. Pp. 153–161.

Дата поступления: 13.01.2026

Решение о публикации: 24.02.2026

Контактная информация:

КАЗАНСКАЯ Лилия Фаатовна — д-р техн. наук, профессор; yalifa@inbox.ru

ФЕДОРОВА Анастасия Николаевна — студент; fedorovaAN2003@yandex.ru

МАКАРОВ Юрий Иванович — старший преподаватель; makarov@pgups.ru

ЛАТЫПОВА Ирина Александровна — канд. пед. наук, доцент; ilatipova5@bk.ru

Optimization of value chain management based on a supplier audit system

L. F. Kazanskaya¹, A. N. Fedorova¹, Yu. I. Makarov¹, I. A. Latypova²

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., 190031, Saint Petersburg, Russia

² Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan Federal University, 13 Mira avenue, 423800, Naberezhnye Chelny, Russia

For citation: *Kazanskaya L. F., Fedorova A. N., Makarov Yu. I., Latypova I. A.* Optimization of value chain management based on a supplier audit system // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 208–217. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-208-217

Abstract

This scientific paper is devoted to investigating the functions of supplier audit within the value chain-management system. **Objective:** To develop methods for supplier auditing as a tool for value chain management, with particular emphasis on formalized selection criteria and a system of evaluation indicators. **Methods:** The research employed methods of generalization based on comparative and statistical analysis, as well as methods of logical construction and concomitant variations. **Results:** The functions and place of auditing activities within the value chain-management system have been identified; the criteria for contractor selection have been structured and ranked; key indicator systems for enabling the quantitative assessment of effective interaction with suppliers have been developed; and a process-based algorithm for conducting audits inspections has been presented. This paper provides a detailed analysis of the procedural stages of an audit, systematizes evaluation criteria for contractor selection, and develops a system of indicators for evaluating the effectiveness of auditing activities. Particular attention is given to the methodology for substantiating the integration of audit procedures into the strategic management of procurement activities. **Practical significance:** Based on a comprehensive study of contemporary management practices, a set of practical recommendations have been formulated aimed at optimizing supplier audit procedures in the context of digital transformation of business models. The study also demonstrates the practical relevance of implementing the proposed audit framework, especially in view of the growing need to enhance the flexibility and responsiveness of value chain-management systems in a changing external environment.

Keywords: contractor audit, value chains, procurement management, supplier reliability assessment, quality control, risk management

References

1. Kirillova E. A., Shtempel' A. N. Kriterii otsenki i vybora postavshchikov radioelektronnykh komponentov // *Upravlencheskij uchet*. 2024. No. 2. S. 275–281. (In Russian)
2. Abdikeeva N. M., Tyutyukina E. B., Bogachev Yu. S. Formirovanie tsepochek proizvodstva dobavlennoj stoimosti v promyshlennosti na osnove biznes-audita // *Ekonomika i upravlenie*. 2019. T. 12, no. 3. S. 68–76. DOI: 10.26794/1999-849X 2019-12-3-68-76. (In Russian)
3. Mamedov N. G. Klyuchevye pokazateli effektivnosti v upravlenii tsepochkami postavok: sbornik materialov XIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii “Mekhanizm realizatsii strategii sotsial’no-ekonomicheskogo razvitiya gosudarstva” / pod red. A. M. Esetovoj. Makhachkala, 2022. S.177–180. EDN: DEWQLO (In Russian)
4. Porter M. Konkurentnoe preimushchestvo: kak dostich' vysokogo rezul'tata i obespechit' ego ustojchivost'. M.: Al'pina Publisher, 2018. 715 s. (In Russian)
5. Barsukov A. P. Struktura tsepochek sozdaniya tsennosti, orientirovannykh na identifikatsionnyye kompaniyami-proizvoditelyami tselevye gruppy pokupatelej molochnoj produktsii // *Konkurentosposobnost' v global'nom mire: ekonomika, nauka, tekhnologii*. 2018. No. 2 (61). S. 15–21. EDN: YQVCAR (In Russian)
6. Marinichev V. A. Kontsepsiya upravleniya, natselennaya na sozdanie tsepochnykh tsennosti, i mekhanizm ee realizatsii // *Voprosy ekonomiki i prava*. 2015. No. 8. S. 93–97. (In Russian)
7. Cheraghi S. H., Dadashzaden M., Subramanian M. Critical factors for supplier selection: an update // *Journal of Applied Business Research*. 2004. Iss. 20 (2). Pp. 91–108. DOI: 10.19030/jabr.v20i2.2209.
8. Upravlenie riskami v logistike: monografiya / V. L. Temnov [i dr.]. M.: TransLit, 2019. 274 s. (In Russian)
9. Tokarev V. V. Otsenka postavshchikov dlya sovershenstvovaniya upravleniya tsepochkami postavok na primere atomnoj promyshlennosti: diss. ... kand. tekhn. nauk. 2020. 211 s. (In Russian)
10. Adeleye E. O. Investigating the impact of organization structure on the performance of the nigerian securities and exchange commission (NSEC) // *European Journal of Business and Management*. 2016. Vol. 8, no. 15. Pp. 153–161.

Received: 13.01.2026

Accepted: 24.02.2026

Author's information:

Lilia F. KAZANSKAYA — Dr. Sci. in Engineering, Professor; yalifa@inbox.ru

Anastasia N. FEDOROVA — Student; fedorovaAN2003@yandex.ru

Yury I. MAKAROV — Senior Lecturer; makarov@pgups.ru

Irina A. LATYPOVA — PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor; ilatipova5@bk.ru

УДК 338.47

Оценка результативности отраслевого рынка городских пассажирских перевозок

Е. М. Волкова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Волкова Е. М. Оценка результативности отраслевого рынка городских пассажирских перевозок // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 218–229. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-218-229

Аннотация

Цель: происходящие изменения географии расселения, приводящие к укрупнению городских территорий, в совокупности со стремительным развитием цифровых технологий диктуют ряд новых требований к пассажирской транспортной системе. Их удовлетворение требует слаженной работы и активного взаимодействия всех видов общественного и личного транспорта, транспорта совместного использования. Можно говорить о тенденции к формированию бесшовных транспортных систем в агломерациях. В этой связи цель исследования — доказать, что интеграция транспортных компаний на рынке городских пассажирских перевозок будет способствовать росту рыночной результативности. **Методы:** для достижения поставленной цели используются общенаучные методы исследования, включая сравнительный анализ, обобщение, индукцию и дедукцию. Кроме того, применяются методы анализа отраслевых рынков, а также статистического анализа данных. **Результаты:** автором разработана концепция бесшовной транспортной системы агломерации и предложены варианты кооперации транспортных компаний, а также ряд инструментов, способствующих повышению результативности исследуемого рынка. Проведена оценка результативности рынка пассажирских перевозок в Санкт-Петербурге. Обоснованы рекомендации по развитию транспортной системы, что позволит повысить не только качество транспортных услуг, но и эффективность используемых ресурсов пассажирского транспортного комплекса в агломерациях. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы в практике государственного регулирования пассажирского транспорта, управления взаимодействием транспортных компаний на региональном уровне, особенно в агломерациях.

Ключевые слова: пассажирские перевозки, результативность рынка, агломерация, бесшовная транспортная система, государственное регулирование, экономика пассажирского транспорта

Введение

Продолжающийся процесс урбанизации приводит к росту числа агломераций и увеличению численности их населения. Развитие агломераций способствует росту национальной экономики, однако может сдерживаться инфраструктурными ограничениями и неэффективным управлением [1]. Анализ показателей пассажирских перевозок в агломерациях показывает наличие ряда проблем в транспортной сфере. К ним можно отнести следующие:

– несоответствие темпов роста населения развитию транспортной инфраструктуры и схем движения общественного транспорта;

- низкая эффективность реализации проектов строительства пассажирских транспортно-пересадочных узлов;
- недостаточно развитое взаимодействие пассажирских транспортных компаний;
- хаотичное развитие форм совместного потребления пассажирских транспортных услуг.

В совокупности эти проблемы приводят к низкой экономической эффективности работы пассажирской транспортной системы и снижают результативность рынка транспортных услуг.

Решение обозначенных проблем предлагается во множестве научных публикаций, посвященных управлению городским пассажирским транспортом. Так, М. Poliak и др. [2] предлагают изменения в управлении парковочным пространством, повышающие эффективность работы транспортных компаний в Европе. Л. М. Чеченова [3] делает акцент на способах расширения маршрутной сети экологических видов наземного транспорта в агломерациях. А. Романов, М. А. Лякина [4] считают, что в агломерациях следует развивать скоростной транспорт, и уточняют подход к оценке стоимости времени жителей агломерации. Л. Ф. Казанская и Н. В. Баталова [5] также подчеркивают преимущества скоростного транспорта на примере магнитолевитационных технологий, принципиально меняющих ситуацию в транспортной отрасли и рынок транспортных услуг. И. М. Гулый и В. Шавурская [6] доказывают, что повышение эффективности перевозок обеспечивается применением цифровых платформ и развитием концепции MaaS. А. В. Акимов и Г. В. Бубнова [7] разработали и апробировали подход к управлению городским транспортом на основе создания цифрового профиля пассажира. М. Горбунова и А. В. Новичихин [8] показывают необходимость развития пассажирских транспортно-пересадочных узлов в агломерациях с участием железнодорожного транспорта и предлагают подход к оценке их эффективности. А. И. Терехова и Д. Н. Власов [9] разрабатывают классификацию пассажирских транспортно-пересадочных узлов в городах-миллионниках, которая учитывает взаимодействие различных видов транспорта. Ученые подчеркивают необходимость согласованного развития различных видов пассажирского транспорта в агломерации. Так, Д. Н. Власов и др. [10] разрабатывают вариант интеграции монорельсового транспорта в Москве в систему трамвайного транспорта.

Краткий обзор публикаций позволяет сделать вывод о том, что ученые признают существование транспортной проблемы в агломерациях и важность ее решения. Вместе с тем предлагаемые мероприятия по повышению эффективности пассажирских транспортных систем отличаются фрагментарностью и затрагивают, как правило, не всю систему, а ее отдельные элементы. Возможные направления развития городского пассажирского транспорта включают развитие экологичного и скоростного внеуличного транспорта, повышение качества обслуживания

пассажирам и точность планирования с применением цифровых технологий, кооперацию видов транспорта и развитие пассажирских транспортно-пересадочных узлов. На взгляд автора, перечисленные направления развития целесообразно осуществлять в рамках комплексного подхода, описывающего целевое состояние рынка пассажирских перевозок в агломерациях, а также методы оценки результативности этого рынка. Мы предлагаем определить это состояние категорией «бесшовная транспортная система агломерации», которая далее будет раскрыта более подробно.

Материалы и методы

Объектом исследования является рынок пассажирских перевозок в агломерации, предметом — процесс оценки результативности исследуемого рынка.

Исследование базируется на положениях теории отраслевых рынков (industrial organization), касающихся содержания категории рыночной результативности (market performance). Для достижения цели исследований используется инструментальный анализ отраслевых рынков, а также методы статистического анализа данных.

В качестве информационной базы используются материалы региональной государственной статистики (Петростат) и годовых отчетов пассажирских транспортных организаций. В процессе исследования используются методы статистического анализа данных, расчета показателей динамики и средних величин.

Результаты

Поскольку пассажирская транспортная система агломерации функционирует в условиях рынка, представляется целесообразным сформировать целевые характеристики этого рынка, а также направления его оценки. Это позволит проводить более рациональную транспортную политику, нацеленную на повышение эффективности использования ресурсов транспортной отрасли.

Отметим, что в текущий период в агломерациях происходит формирование новых требований к пассажирской транспортной системе. Они обусловлены, с одной стороны, особенностями самих городов, расселения и застройки, с другой — происходящими изменениями в технике и технологии перевозок. Удовлетворение этих требований должно оцениваться показателями, характеризующими состояние пассажирской транспортной системы агломерации в рыночной экономике. Так, например, повышение ценности времени городского населения приводит к появлению требования часовой транспортной доступности при поездке в агломерации. Следовательно, при оценке состояния рынка необходимо учитывать сокращение среднего времени поездки с трудовыми целями.

Новые требования, а также показатели для оценки их соблюдения представлены на рис. 1.



Рис. 1. Подход к оценке рынка пассажирских транспортных услуг в агломерации

На наш взгляд, учет соблюдения требований, перечисленных на рис. 1, можно осуществить на основе оценки результативности рынка пассажирских перевозок в агломерации. Традиционно результативность представляется как мера эффективности распределения ограниченных ресурсов на определенном рынке. Ее принято оценивать по четырем направлениям: эффективность, прогрессивность, полная занятость, справедливость. Учитывая специфику рынка пассажирских транспортных услуг в агломерации, а также характеристики его целевого состояния, мы предлагаем для оценки результативности вместо направления «полная занятость» ввести направление «кооперация видов транспорта». Это целесообразно потому, что степень согласованного взаимодействия транспортных компаний на рынке

во многом определяет развитие бесшовной транспортной системы и выполнение требований к транспортным услугам (рис. 1).

Многоуровневый подход к оценке результативности рынка предполагает проведение оценки на различных уровнях — от глобального до уровня компании. Для оценки результативности исследуемого рынка мы предлагаем выделить три уровня:

1. Уровень государства (региональные органы исполнительной власти).
2. Уровень транспортной компании.
3. Уровень населения (потребителя).

Государство выступает как заказчик объема и качества транспортных услуг, поскольку несет ответственность за транспортное обслуживание населения. Также государство субсидирует выпадающие доходы пассажирских транспортных компаний, которые осуществляют пассажирские перевозки и взаимодействуют в процессе предоставления мультимодальных транспортных услуг. Население является потребителем транспортных услуг и оценивает их качество. Эти три уровня имеют различные интересы, и, следовательно, для проведения комплексной оценки рынка необходимо учитывать их представления об эффективности, прогрессивности, мультимодальности и справедливости. Для этого предлагаются следующие показатели рыночной результативности (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Подход к оценке результативности рынка пассажирских перевозок в агломерации

Уровень/направление оценки	Уровень участника рынка	Уровень государства	Уровень населения
Эффективность	Опережающий рост операционных показателей по отношению к расходам	Выполнение заказанного объема перевозок при снижении субсидий транспортным компаниям	Точность выполнения расписания всех видов общественного транспорта
Прогрессивность	Доля услуг, реализованных через цифровые каналы	Рост транспортной подвижности населения	Рост числа пользователей цифровых платформ MaaS
Кооперация видов транспорта	Доля интермодальных услуг	Рост числа транспортно-пересадочных узлов	Сокращение среднего времени поездки
Справедливость	Полная компенсация недополученных доходов	Рост объема перевозок общественным транспортом	Замедленный рост транспортных тарифов по отношению к общему уровню цен на потребительские товары и услуги

На основе подхода, представленного в табл. 1, была разработана система показателей для оценки результативности рынка пассажирских перевозок в агломерации (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Показатели результативности рынка пассажирских перевозок в агломерации

Уровень/направление оценки	Уровень участника рынка	Уровень государства	Уровень населения
Эффективность	$\frac{p_0}{p_1}$	$\frac{\text{Тр} \sum_{i=1}^n A_i}{\text{Тр} \sum_{i=1}^n B_{\text{компенси}}}$	$\sum (D_{i1} / D_{i0}) \cdot \gamma_i$
Прогрессивность	$\frac{z_{п1}}{z_{п0}}$	$\frac{m_1}{m_0}$	$\frac{u_1}{u_0}$
Кооперация видов транспорта	$\frac{z_{к1}}{z_{к0}}$	$\frac{n_1}{n_0}$	$\frac{t_0}{t_1}$
Справедливость	$\frac{B}{\sum T \cdot Al - \sum \text{ЭОЗ}}$	$\frac{\sum_{i=1}^n A_{\text{факт}}}{\sum_{i=1}^n A_{\text{план}}}$	$\sum \frac{\text{ИПЦ}_1}{(T_{i1} / T_{i0}) \cdot \gamma_i}$

В табл. 2 индексами 0 и 1 обозначаются показатели отчетного и базового периода. Для оценки результативности на уровне участника используются показатели: p — затраты на 1 пасс. км; $z_{п}$ — доля билетов, проданных онлайн; $z_{к}$ — доля билетов на мультимодальные поездки; B — компенсация недополученной выручки от государства; T — тариф; Al — пассажирооборот; $\sum \text{ЭОЗ}$ — экономически обоснованные затраты.

Для оценки результативности на уровне государства используются показатели: $\text{Тр} \sum_{i=1}^n A_i$ — темп роста объема перевозок общественным транспортом; $\text{Тр} \sum_{i=1}^n B_{\text{компенси}}$ — темп роста компенсаций недополученной выручки участникам рынка; $\sum_{i=1}^n A_{\text{факт}}$, $\sum_{i=1}^n A_{\text{план}}$ — мобильность населения; m — число транспортно-пересадочных узлов; n — фактический и плановый объем перевозок пассажиров общественным транспортом.

Для оценки результативности на уровне населения используются показатели: D — точность исполнения расписания; γ_i — доля i -го вида транспорта в структуре перевозок; t — число пользователей мобильных транспортных приложений; u — среднее время в пути; T — индекс потребительских цен ИПЦ и транспортный тариф.

Апробация предложенного подхода к оценке результативности рынка пассажирских перевозок проводится на примере Санкт-Петербурга. В качестве отчетного года был выбран 2023 год, в качестве базового — 2021 год. Некоторые данные о работе транспорта приведены в табл. 3.

В табл. 3 обращает на себя внимание невысокая доля метрополитена в структуре пассажирских перевозок, которая в динамике снижается. Это является следствием транспортной реформы, в ходе которой появились дополнительные автобусные маршруты. Кроме того, строительство новых станций метрополитена в Санкт-Петербурге происходит очень невысокими темпами. При этом индексы цен на проезд в общественном транспорте превышают индекс потребительских цен. Данные о продажах единых билетов, предоставляющих возможность проезда в нескольких видах транспорта, представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 3. Данные о работе общественного транспорта в Санкт-Петербурге

Показатель	Значение в базовом периоде	Значение в отчетном периоде
Точность выполнения расписания метрополитена	100%	100%
Точность выполнения расписания автобусов	95,4%	95,5%
Точность выполнения расписания наземного городского электрического транспорта	93,7%	92,1%
Доля метрополитена в пассажиропотоке	49,6%	45,8%
Доля наземного городского электрического транспорта в пассажиропотоке	21,4%	20,5%
Доля автобусов в пассажиропотоке	29%	33,7%
Индекс потребительских цен	108,6%	
Индекс цен на проезд в метрополитене	109,1%	
Индекс цен на проезд в наземном пассажирском транспорте	110%	

ТАБЛИЦА 4. Данные о доле продаж единых проездных билетов в Санкт-Петербурге

Показатель	Значение в базовом периоде	Значение в отчетном периоде
Единый электронный билет	43,3%	47,3%
Месячный единый билет	2,8%	2,8%
Суточные единые билеты и единый билет на 90 минут	–	1,2%
Месячный именной единый билет для студентов	4,2%	4,2%
Месячный единый именной льготный билет	15,3%	15,3%
Итого единые билеты	65,6%	70,8%

Из табл. 4 видно, что наблюдается рост продаж единых билетов в Санкт-Петербурге, при этом наибольшая доля продаж приходится на единый электронный билет, который действует в метрополитене и наземном общественном транспорте. Также происходит расширение тарифного меню: вводятся новые виды единых билетов, что увеличивает их долю в продажах на 1,2 %.

В табл. 5 представлены итоги оценки результативности рынка пассажирских перевозок в Санкт-Петербурге.

ТАБЛИЦА 5. Показатели результативности рынка пассажирских перевозок в Санкт-Петербурге

Уровень/направление оценки	Уровень участника рынка	Уровень государства	Уровень населения
Эффективность	0,781	0,824	1,070
Прогрессивность	0,584	0,936	>1
Кооперация видов транспорта	1,079	<1	1,140
Справедливость	1,006	0,879	0,990

Как видно из табл. 5, из 12 показателей 7 — менее единицы, что говорит о неудовлетворительной динамике рынка. Особое внимание обращает на себя оценка на уровне государства: все показатели результативности менее 1, что говорит о нерациональном регулировании рынка и необходимости корректировки транспортной политики. В то же время для населения три из четырех показателей — более 1, что говорит о положительной динамике качества транспортного обслуживания и развитии комплексных транспортных услуг при несправедливом росте транспортных тарифов. По направлению «Кооперация видов транспорта» оценка менее 1 на уровне государства связана с недостаточными темпами строительства пассажирских ТПУ.

Заключение

Несмотря на то что предложенная система показателей (табл. 5) позволяет получить представление о динамике исследуемого рынка, она нуждается в дальнейшей доработке. Ее ограниченность заключается в построении показателей, которые можно оценить по открытым данным транспортных компаний, официальной статистической информации. Однако официальная статистика не всегда отражает реальное положение дел на рынке пассажирских перевозок. Например, существует сегмент совместного потребления, оценить который в настоящий период практически невозможно. Кроме того, отсутствует оценка нелегальных сегментов рынка, которые возникают в связи с перегруженностью транспортных средств на

регулярных маршрутах наземного общественного транспорта. По этой причине методика оценки результативности имеет перспективы в плане содержательной доработки. Кроме того, она может быть модифицирована с учетом специфики конкретной агломерации при сохранении принципов и направлений оценки.

На основании оценки и регулярного мониторинга результативности рынка городских пассажирских перевозок рекомендуется корректировка транспортной политики регионального уровня. Так, на основе значений, полученных в табл. 5, можно рекомендовать следующие направления развития пассажирской транспортной системы в Санкт-Петербургской агломерации:

1. Участнику рынка (ГУП «Петербургский метрополитен») разработать план мероприятий по оптимизации затрат и усилить развитие цифровых каналов продаж билетов.

2. Региональным органам исполнительной власти увеличить число маршрутов общественного транспорта, особенно в периферийных районах агломерации с высокими темпами жилой застройки.

3. Провести анализ загруженности маршрутов и внести изменения в реестр маршрутов города с учетом имеющегося и перспективного спроса, условий поездки;

4. Провести анализ удовлетворенности пассажиров работой общественного транспорта в каждом районе агломерации.

5. Направить свободные средства на строительство новых станций метрополитена и транспортно-пересадочных узлов.

6. Стабилизировать рост тарифов на проезд в общественном транспорте с целью обеспечения справедливости для населения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Identification of the impact of transport performance on the economy of particular area / M. Poliak [et al.] // Logi. Scientific Journal on Transport and Logistics. 2023. Vol. 14, no. 1. Pp. 192–202. DOI: 10.2478/logi-2023-0018.

2. Identifying the impact of parking policy on road transport economics / M. Poliak [et al.] // Mobile Networks and Applications, 2021. DOI: 10.1007/s11036-021-01786-6.

3. Chechenova L. Assessment of the prospects for the development of green land rail transport in a large metropolis. // E3S Web of Conferences. 2025. Vol. 670. P. 05001. DOI: 10.1051/e3sconf/202567005001.

4. Romanov A., Lyakina M.A. Travel time estimation as a global trend in the analysis of innovative transportation projects. // SHS WEB OF CONFERENCES. The 21st International Scientific Conference Globalization and its Socio-Economic Consequences. 2021. P. 11011. DOI: 10.1051/shsconf/202112911011.

5. Kazanskaya L. F., Batalova N. V. Innovative technologies in the development of high-speed ground transport. // Modern Transportation Systems and Technologies. 2023. Vol. 9, no 4. Pp. 108–116. DOI: 10.17816/transsyst202394108-116.

6. Gulyi I., Shavurskaya V. Digital platform solutions of russian railways as a tool for the development of the concept of maas (Mobility as a Service) // E3S Web of Conferences. International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) “Actual problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution”. 2023. P. 01015. DOI: 10.1051/e3sconf/202338301015.

7. Akimov A. V., Bubnova G. V. Public passenger transport logistics in the context of digital transformation of transportation services organisation systems // World of Transport and Transportation. 2021. Vol 19. Pp. 62–73. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-4-7.

8. Gorbunova M., Novichikhin A. Improvement of the system of transport-transfer hubs on the example of St. Petersburg agglomeration // E3S WEB OF CONFERENCES International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) “Actual problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution”. 2023. P. 01006. DOI: 10.1051/e3sconf/202338301006.

9. Terekhova A. I., Vlasov D. N. Classification of transport-transfer hubs, taking into account the interaction of modes of transport in cities with million-strong cities // E3S WEB OF CONFERENCES. XII International Scientific and Practical Forum “Environmentally sustainable cities and settlements: problems and solutions” (ESCP-2023). 2023. P. 403. DOI: 10.1051/e3sconf/202340307021

11. Vlasov D. N., Vakulenko S. P., Romenskii D. Yu. Redevelopment of the Moscow monorail // Real Estate: Economics, Management. 2021. No 1. Pp. 80–88. DOI: 10.22337/2073-8412-2021-1-80-88.

Дата поступления: 20.01.2026

Решение о публикации: 04.03.2026

Контактная информация:

ВОЛКОВА Елена Михайловна — д-р экон. наук, доцент; Moonlight34@ya.ru

The performance assessment of urban passenger transportation market

E. M. Volkova

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Volkova E. M.* The performance assessment of urban passenger transportation market // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 218–229. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-218-229. (In Russian)

Abstract

Objective: ongoing changes in settlement patterns, leading to the expansion and consolidation of urban areas, together with the rapid development of digital technologies, impose a number of new requirements on the passenger transport system. Meeting these requirements necessitates coordinated operation and active interaction among all modes of public and private transport, as well as shared mobility services. In this context, a trend toward the formation of seamless transport systems within urban agglomerations can be observed. Therefore, the purpose of this study is to demonstrate that the integration of transport companies in the urban passenger transportation market will contribute to an increase in market performance. **Methods:** to achieve this objective, general scientific research methods were employed, including comparative analysis, generalization, induction, and deduction. In addition, methods of industry market analysis and statistical data analysis were applied. **Results:** the research has proposed a concept of a seamless transport system for an agglomeration. It developed options for cooperation among transport companies, along with a number of tools aimed at improving the performance of the market under study. An assessment of the performance of the passenger transportation market in St. Petersburg has been carried out. Recommendations for the development of the transport system have been substantiated, which will make it possible to improve not only the quality of transport services but also the efficiency of resources used by the passenger transport system in agglomerations. **Practical significance:** the results obtained may be used in the practice of state regulation of passenger transport and in managing the interaction of transport companies at the regional level, especially in agglomerations.

Keywords: passenger transportation, market performance, agglomerations, seamless transport system, state regulation, passenger transport economics

References

1. Identification of the impact of transport performance on the economy of particular area / M. Poliak [et al.] // *Logi. Scientific Journal on Transport and Logistics*. 2023. Vol. 14, no. 1. Pp. 192–202. DOI: 10.2478/logi-2023-0018.
2. Identifying the impact of parking policy on road transport economics / M. Poliak [et al.] // *Mobile Networks and Applications*, 2021. DOI: 10.1007/s11036-021-01786-6.
3. Chechenova L. Assessment of the prospects for the development of green land rail transport in a large metropolis. // *E3S Web of Conferences*. 2025. Vol. 670. P. 05001. DOI: 10.1051/e3sconf/202567005001.
4. Romanov A., Lyakina M.A. Travel time estimation as a global trend in the analysis of innovative transportation projects. // *SHS WEB OF CONFERENCES. The 21st International Scientific Conference Globalization and its Socio-Economic Consequences*. 2021. P. 11011. DOI: 10.1051/shsconf/202112911011.
5. Kazanskaya L. F., Batalova N. V. Innovative technologies in the development of high-speed ground transport. // *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023. Vol. 9, no 4. Pp. 108–116. DOI: 10.17816/transsyst202394108-116.
6. Gulyi I., Shavurskaya V. Digital platform solutions of russian railways as a tool for the development of the concept of maas (Mobility as a Service) // *E3S Web of Conferences. International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) “Actual problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution”*. 2023. P. 01015. DOI: 10.1051/e3sconf/202338301015.

7. Akimov A. V., Bubnova G. V. Public passenger transport logistics in the context of digital transformation of transportation services organisation systems // *World of Transport and Transportation*. 2021. Vol 19. Pp. 62–73. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-4-7.

8. Gorbunova M., Novichikhin A. Improvement of the system of transport-transfer hubs on the example of St. Petersburg agglomeration // *E3S WEB OF CONFERENCES International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) “Actual problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution”*. 2023. P. 01006. DOI: 10.1051/e3sconf/202338301006.

9. Terekhova A. I., Vlasov D. N. Classification of transport-transfer hubs, taking into account the interaction of modes of transport in cities with million-strong cities // *E3S WEB OF CONFERENCES. XII International Scientific and Practical Forum “Environmentally sustainable cities and settlements: problems and solutions” (ESCP-2023)*. 2023. P. 403. DOI: 10.1051/e3sconf/202340307021

11. Vlasov D. N., Vakulenko S. P., Romenskii D. Yu. Redevelopment of the Moscow monorail // *Real Estate: Economics, Management*. 2021. No 1. Pp. 80–88. DOI: 10.22337/2073-8412-2021-1-80-88.

Received: 20.01.2026

Accepted: 04.03.2026

Author’s information:

Elena M. VOLKOVA — Dr. Sci. in Economics, Associate Professor; Moonlight34@ya.ru