

ISSN 0201–727X

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

# **ВЕСТНИК**

**Ростовского государственного университета  
путей сообщения**

**Научно-технический журнал**

**№ 1 (101)**

Ростов-на-Дону  
2026

**ВЕСТНИК**  
**Ростовского государственного университета путей сообщения**

2026  
№ 1 (101)

Научно-технический журнал  
Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-77245 от 20 ноября 2019 г.  
Федеральной службы по надзору в сфере связи  
информационных технологий и массовых  
коммуникаций.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Главный редактор журнала**

**В.И. Колесников**, академик Российской академии наук, заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**М.П. Бадёр**, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО Московский государственный университет путей сообщения (РУТ МИИТ), г. Москва

**А.В. Белый**, член-корреспондент НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

**А.В. Божениук**, д-р техн. наук, проф., Южный федеральный университет (ЮФУ), г. Таганрог

**М.А. Бутакова**, д-р техн. наук, проф., Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), г. Москва

**В.Д. Верескун**, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**О.А. Ворон**, д-р техн. наук, доц., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**А.Н. Гуда**, д-р техн. наук, проф., заместитель главного редактора, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**Ф. Даниэль**, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет дю Мэн, г. Ле-Ман, Франция

**И.Д. Долгий**, д-р техн. наук, проф., Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), г. Москва

**А.А. Зарифьян**, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**В.В. Зырянов**, д-р техн. наук, проф., Донской государственный технический университет (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону

**П.Г. Ивановкин**, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**С.М. Ковалев**, д-р техн. наук, проф., Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), г. Москва

**И.В. Котенко**, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), г. Санкт-Петербург

**А.Г. Кочур**, д-р физ.-мат. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**Н.Н. Лябах**, д-р техн. наук, проф., Международная Академия Менеджмента и Технологий INTAMT, г. Дюссельдорф, Северный Рейн-Вестфалия, Германия

**И.А. Майба**, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**Э.А. Мамаев**, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**М.А. Мукутадзе**, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**В.И. Новакович**, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**В.А. Осипов**, к-т техн. наук, доц., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**А.Д. Петрушин**, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**А. Сладковски**, д-р техн. наук, проф., Силезский технический университет, г. Катовице, Польша

**С.В. Соколов**, д-р техн. наук, проф., Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), г. Москва

**В.А. Соломин**, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**В. Стыскала**, д-р, ассоц. проф., Остравский технический университет, г. Острава, Чешская Республика

**В.Н. Таран**, д-р физ.-мат. наук, проф., Донской государственный технический университет (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону

**В.А. Финоченко**, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**О.Н. Числов**, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**А.Н. Чукарин**, д-р техн. наук, проф., Донской государственный технический университет (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону

**В.В. Шаповалов**, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**В.Л. Шаповалов**, д-р техн. наук, доц., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**И.А. Яицков**, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**А.О. Куделина**, ответственный секретарь, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

**VESTNIK RGUPS**  
**Scientific and Technical Journal**

**EDITORIAL BOARD**

**Editor-in-chief**

**V.I. Kolesnikov**, academician of Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

**M.P. Bader**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow State Transport University (RUT MIIT), Moscow

**A.V. Belyj**, Corresponding member NAS of Belarus, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Physic Technical Institute NAS of Belarus, Minsk, Belarus

**A.V. Bozhenyuk**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southern Federal University (SFedU), Taganrog

**M.A. Butakova**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Research and Design Institute of Information, Automation and Communication in Railway Transport (NIIAS), Moscow

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

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

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

**Ph. Daniel'**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Universite du Maine, Le Mans, France

**I.D. Dolgiy**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow

**A.A. Zarifyan**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

**V.V. Zyryanov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don

**P.G. Ivanochkin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

**S.M. Kovalev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow

**I.V. Kotenko**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg

**A.G. Kochur**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

**N.N. Lyabakh**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, The International Academy for Management and Technology (INTAMT), Dusseldorf, North Rhine-Westphalia, Germany

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

**E.A. Mamaev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

**M.A. Mukutadze**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

**V.I. Novakovich**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

**V.A. Osipov**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, RSTU, Rostov-on-Don

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

**A. Sladkowski**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Silesian University of Technology, Katowice, Poland

**S.V. Sokolov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow Technical University of Communication and Informatics (MTUCI), Moscow

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

**V. Stýskala**, Doctor, PhD, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic

**V.N. Taran**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Don State Technical University (DSTU),

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

**O.N. Chislov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

**A.N. Chukarin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Don State Technical University (DSTU),

**V.V. Shapovalov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

**V.L. Shapovalov**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, RSTU, Rostov-on-Don

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

## ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

<b>Кадыров Т.Р., Нужная Т.В., Полагутина Ю.А., Халитова Э.Х.</b> Современные методы гидрофобизации материалов: химические и микробиологические решения для железнодорожной инфраструктуры.....	8
--	---

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,  
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

<b>Алымов И.О.</b> Анализ параметров базовых архитектур нейронных сетей в транспортных системах управления.....	20
---	----

## ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

<b>Осипов В.А.</b> Определение электрических параметров тяговых сетей, интегрированных с волоконно-оптическими линиями связи.....	28
---	----

## УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

<b>Осьминин А.Т., Малахова Т.А., Рящиков А.С., Осьминина И.И.</b> Обзор исследований применения искусственного интеллекта и цифровых двойников для ускорения транспортных потоков на железнодорожном транспорте.....	36
<b>Середов Е.А., Осипов А.П.</b> Имитационная модель прибытия и расформирования поездов на сортировочной станции.....	43
<b>Тихненко С.А., Некрасов К.В.</b> Имитационная модель кооперативной консолидации мелкопартионных грузов на железнодорожном транспорте.....	51
<b>Фонсека М.О.</b> Прогнозирование успешности реализации проектов присоединения железнодорожных путей необщего пользования с использованием ансамблевых методов машинного обучения.....	59

## ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

<b>Бейн Д.Г., Цыганская Л.В.</b> Обоснование конструкции двухсекционного съемного кузова для перевозки легковых автомобилей на длиннобазных вагонах-платформах.....	66
<b>Буриков С.В., Цыганская Л.В.</b> Уточненная оценка общего коэффициента теплопередачи вагонов-термосов на этапе проектирования.....	82
<b>Гаджиметов Г.И., Ильин И.Е., Курдинов Д.С., Трифонов А.В.</b> Выбор параметров рессорного подвешивания трехосной тележки грузового вагона с повышенной конструкционной скоростью.....	90
<b>Гучинский Р.В.</b> Снижение металлоемкости рамы кузова моторвагонного подвижного состава.....	102
<b>Коржов С.Н., Поляков П.А., Яицков И.А.</b> Метод расчета нормальных и тангенциальных силовых факторов в тормозных устройствах с клещевым механизмом при движении электропоезда на кривых участках пути.....	110
<b>Пляскин А.К., Потапов А.А.</b> Способы разграничения технических состояний локомотивов.....	121
<b>Томилов В.С., Волчек Т.В.</b> Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока за счет адаптивного управления фазовым соотношением электродвижущих сил в тяговом электродвигателе.....	135
<b>Шмойлов А.Н.</b> Разработка системы управления электрическим приводом мостового крана в условиях вагоноремонтного предприятия железнодорожного транспорта.....	143

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

<b>Ананко А.М.</b> Повышение износостойкости эпоксидных композитов введением микрокапсулированных смазочных материалов и частиц оксида магния.....	151
<b>Гасанов Б.Г., Харченко Е.В., Панчвидзе Г.Г.</b> Повышение трибологических характеристик порошковых железомеднографитовых сплавов.....	161
<b>Исаев А.Г., Бивзюк Э.В., Чукарина И.М.</b> Повышение эффективности технологического процесса упрочнения несущих конструкций транспортных машин .....	176
<b>Кротов С.В.</b> Особенности работы системы «колесо – рельс» при тяжеловесном движении...	182
<b>Лозовая С.Ю., Воронов В.П., Кравченко В.М.</b> Математическое описание процесса переработки резинотехнических изделий рабочим органом с изменяемой компоновкой ножей.....	195
<b>Майба И.А., Ананко А.М., Майба И.И.</b> Анализ режимов функционирования системы активации трения на электровозах серии ЗЭС5К.....	203
<b>Ханин С.И., Зыбин Р.В., Воронов В.П., Мордовская О.С.</b> Определение поля скоростей материаломелющей загрузки в бисерной мельнице с винтовым устройством.....	209

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

<b>Осьминин А.Т., Баушев А.Н., Осьминин Л.А.</b> Метод построения парето-оптимальных логистических схем перемещения вагонов и его применение для нормирования рабочего парка.....	219
---	-----

## CONTENTS

## RAIL TRACK AND TRANSPORT CONSTRUCTION

- Kadyrov T.R., Nuzhnaya T.V., Polagutina Yu.A., Khalitova E.Kh.** Modern methods of material hydrophobization: chemical and microbiological solutions for railway infrastructure..... 8

## INFORMATION TECHNOLOGIES, AUTOMATION AND TELECOMMUNICATIONS

- Alymov I.O.** Analysis of parameters of basic neural network architectures in transport control systems..... 20

## POWER ENGINEERING ON TRANSPORT

- Osipov V.A.** Determination of electrical parameters of traction networks integrated with fiber-optic communication lines..... 28

## OPERATION AND LOGISTICS ON TRANSPORT

- Osminin A.T., Malakhova T.A., Ryashchikov A.S., Osminina I.I.** Review of research on the application of artificial intelligence and digital twins for accelerating railway transport flows..... 36
- Seredov E.A., Osipov A.P.** Simulation model of trains arrival and breaking-up at the marshalling yard..... 43
- Tikhnenko S.A., Nekrasov K.V.** A simulation model of cooperative consolidation of small-batch freight on railway transport..... 51
- Fonseca M.O.** Predicting the viability of non-public railway track connection projects using ensemble machine learning methods..... 59

## ROLLING STOCK, TRAFFIC SAFETY

- Bein D.G., Tsyganskaya L.V.** Rationale for the design of a two-section removable body for transporting passenger cars on long-wheel flat cars..... 66
- Burikov S.V., Tsyganskaya L.V.** An updated estimate of the total heat transfer coefficient of thermos cars at the design stage ..... 82
- Gadzhimetov G.I., Ilyin I.E., Kurdikov D.S., Trifonov A.V.** Selection of parameters for the spring suspension of a three-axle freight car bogie with in-creased design speed..... 90
- Guchinsky R.V.** Reducing the metal intensity of the EMU-train car body frame..... 102
- Korzhov S.N., Polyakov P.A., Yaitskov I.A.** A method for calculating normal and tangential force factors in braking devices with a pincer mechanism while an electric train operating on curve track sections..... 110
- Plyaskin A.K., Potapov A.A.** Methods for differentiating technical conditions of locomotives..... 121
- Tomilov V.S., Volchek T.V.** Increasing the energy efficiency of AC electric locomotives through adaptive control of the phase relationship of electric motor forces in the traction motor..... 135
- Shmoilov A.N.** Development of an electric drive control system for a bridge crane in a railway carriage repair facility..... 143

## MECHANICAL ENGINEERING

- Ananko A.M.** Enhancement of wear resistance of epoxy composites by introduction of microencapsulated lubricants and magnesium oxide particles..... 151
- Gasarov B.G., Kharchenko E.V., Panchvidze G.G.** Improving the tribological characteristics of powdered iron-copper-graphite alloys..... 161
- Isaev A.G., Bivzyuk E.V., Chukarina I.M.** Improving the efficiency of the hardening process of load-bearing structures of transport machines..... 176
- Krotov S.V.** Operating features of the wheel-rail system during heavy-haul traffic..... 182
- Lozovaya S.Yu., Voronov V.P., Kravchenko V.M.** Mathematical description of the process of recycling rubber products by a working element with a variable arrangement of knives..... 195

<b>Maiba I.A., Ananko A.M., Maiba I.I.</b> Analysis of operating modes of the friction activation system in 3ES5K electric locomotives .....	203
<b>Khanin S.I., Zybin R.V., Voronov V.P., Mordovskaya O.S.</b> Determination of the velocity field of the material grinding loading in a bead mill with a screw device.....	209

#### MODELING SYSTEMS AND PROCESSES

<b>Osminin A.T., Baushev A.N., Osminin L.A.</b> A method for constructing Pareto-optimal logistic schemes for car movement and its application for standardization of the working fleet.....	219
--	-----

## ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 544.70.023.2

DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_8

*Т. Р. Кадыров, Т. В. Нужная, Ю. А. Полагутина, Э. Х. Халитова***СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ГИДРОФОБИЗАЦИИ МАТЕРИАЛОВ:  
ХИМИЧЕСКИЕ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ  
ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

**Аннотация.** Представлен обзор современных методов гидрофобизации материалов, направленных на повышение долговечности и надёжности элементов железнодорожной инфраструктуры в условиях воздействия влаги и агрессивных факторов окружающей среды. Рассмотрены принципы формирования гидрофобных покрытий, механизмы действия гидрофобных растворов и методы оценки гидрофобности с использованием краевого угла смачивания. Особое внимание уделено микробиологическим подходам к гидрофобизации, основанным на применении микроорганизмов и синтезируемых ими биополимеров. Проанализированы области практического применения гидрофобных материалов при защите металлических конструкций, бетонных и железобетонных элементов, а также материалов верхнего строения пути от коррозии, влагонасыщения и биоповреждений. Отдельно рассмотрены экологические аспекты использования биосурфактантов и перспективы внедрения экологически безопасных гидрофобных покрытий в железнодорожной отрасли.

**Ключевые слова:** гидрофобизация материалов, железнодорожная инфраструктура, гидрофобные покрытия, материалы верхнего строения пути; краевой угол смачивания, микробиологические методы, биосурфактанты, защита от влаги, экологически безопасные технологии.

**Для цитирования:** Современные методы гидрофобизации материалов: химические и микробиологические решения для железнодорожной инфраструктуры / Т. Р. Кадыров, Т. В. Нужная, Ю. А. Полагутина, Э. Х. Халитова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 8–19. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_8.

**Введение**

Проблема пагубного влияния влаги на различного рода материалы остаётся актуальной уже на протяжении долгого времени, особенно в условиях эксплуатации объектов железнодорожной инфраструктуры. Попадая в поры или пустоты, вода начинает растворять те составляющие, которые растворимы, следовательно, её воздействие может стать разрушающим для ряда конструкций [1]. Это проявляется в виде снижения прочности материалов, развития биокоррозии, образования высолов и других нежелательных процессов, что отрицательно сказывается как на внешнем виде, так и на эксплуатационных характеристиках конструкции.

Особое внимание при этом уделяется методам защиты строительных материалов от избыточного увлажнения, среди которых особое место занимает гидрофобизация – придание поверхности материала водоотталкивающих свойств. Гидрофобизация позволяет значительно повысить стойкость материалов к капиллярному водопоглощению, предотвращает проникновение воды внутрь конструкции и увеличивает срок службы сооружений [1]. Современные технологии в этой области включают использование органосилоновых, силоксановых и других составов, образующих тонкие слои на поверхности материала без изменения его паропроницаемости, что особенно важно для конструкций мостов и тоннелей.

На смачивание влияют различные характеристики самих материалов. Одним из важнейших факторов является пористая структура: размер пор, их расположение и распределение оказывают значительное влияние на степень смачивания [2]. Многие исследования направлены на изучение возможности изменения пористой структуры материала, чтобы улучшить его эксплуатационные характеристики. Химический состав и свойства поверхности также играют важную роль. Определённые молекулы, находящиеся на поверхности материала, могут влиять на его взаимодействие с жидкостями, делая его более гидрофильным или, наоборот, гидрофобным. Исходя из всего этого появляется необходимость целенаправленно изменять уже имеющиеся характеристики некоторых материалов, чтобы увеличить срок их эксплуатации и улучшить качество [2].

В последние годы всё большее внимание уделяется биологическим методам модификации поверхностей, основанным на использовании микроорганизмов. Особый интерес вызывают гидрофобные и гидрофильные свойства микроорганизмов, поскольку они могут быть использованы для создания защитных покрытий или активизации смачивания материалов. Гидрофобность клеточной поверхности (ГКП) микроорганизмов определяется наличием специфических компонентов клеточной стенки, таких как липополисахариды, белки, полисахариды и поверхностно-активные вещества (ПАВ), выделяемые самими микроорганизмами. Например, *Bacillus subtilis* продуцирует липопептиды, такие как сурфактин, которые обладают высокой поверхностной активностью и могут снижать поверхностное натяжение воды, тем самым изменяя гидрофобные свойства твёрдых поверхностей [3].

Исследования показали, что ГКП напрямую влияет на их адгезию к различным материалам. Адгезия микроорганизмов к поверхностям – первый этап формирования биоплёнки. Этот этап адгезии во многом определяется физико-химическими взаимодействиями, в первую очередь силами Лифшица – ван дер Ваальса, кислотно-основными и электростатическими взаимодействиями. Эти взаимодействия зависят от физико-химических свойств, в том числе от гидрофобности, электростатического заряда и характеристик доноров и акцепторов электронов. Микроорганизмы с выраженной ГКП демонстрируют более высокую способность к прилипанию к гидрофобным поверхностям, таким как пластмассы или обработанные силанами строительные материалы [4]. Это свойство может быть использовано для создания защитных биопленок, которые снижают проникновение воды в пористые материалы, например, в кирпич или бетон. Напротив, гидрофильные микроорганизмы лучше взаимодействуют с полярными поверхностями, такими как стекло или оксидированные металлы, что позволяет использовать их в процессах, требующих улучшенного смачивания [5].

Кроме того, гидрофобные свойства микроорганизмов могут быть модифицированы под действием внешних факторов, таких как pH среды, наличие ионов металлов или органических добавок. Например, добавление  $Ca^{2+}$  может усиливать ГКП за счёт изменения заряда клеточной стенки и формирования комплексов с анионными группами. Также известно, что некоторые штаммы бактерий могут изменять свои поверхностные свойства в ответ на условия окружающей среды, что делает их потенциально полезными в адаптивных системах защиты материалов от влаги [6].

Таким образом, интеграция химических и микробиологических методов гидрофобизации представляет собой перспективное направление повышения долговечности и эксплуатационной надёжности объектов железнодорожной инфраструктуры. Реализация данных подходов позволяет снизить влагопроницаемость конструкций, минимизировать применение агрессивных реагентов и обеспечить экологически безопасную защиту материалов в условиях интенсивной эксплуатации.

#### ***Физико-химические и биологические принципы гидрофобности***

Именно поэтому широкое распространение получил метод гидрофобизации. Это процесс снижения способности материалов пропускать воду, путём применения специальных растворов.

Гидрофобизация используется в следующих целях:

- предотвращение проникновения влаги в структуру материала;
- повышение теплоизоляционных свойств материала;
- защита конструкции от коррозии;
- повышение морозостойкости;
- предупреждение развития микроорганизмов;
- повышение прочности материала [7].

Степень гидрофобности и гидрофильности поверхности определяет краевой угол смачивания. Это угол между касательной к поверхности капли жидкости и поверхностью твёрдого материала в точке их контакта [8]. Если краевой угол смачивания составляет менее 90 градусов, то поверхность считается гидрофильной (т.е. хорошо смачивается). Если же краевой угол больше 90 градусов, то поверхность гидрофобная (т.е. не смачивается водой, а капля принимает более сферическую форму). Также краевой угол может составлять более 150 градусов, в данном случае поверхность будет считаться сверхгидрофобной [9].

ГКП – биофизический параметр, влияющий на адгезию грибковых клеток или спор к биотическим и абиотическим поверхностям, другими словами, это способность микроорганизмов отталкивать воду, которая определяется структурой и химическим составом внешних слоёв клеточной стенки, таких как белки, липополисахариды, тейхоевые кислоты и экзополисахариды. Гидрофобность играет ключевую роль в процессах прилипания, формирования биопленок, патогенности и взаимодействия с окружающей средой [10]. У диморфных грибов множество факторов, в том числе вызванный темпера-

турой переход между плесневой и дрожжевой формами, сильно влияют на ГКП: более высокая гидрофобность чаще встречается при более низких температурах, способствующих росту нитевидных клеток [11]. Некоторые штаммы *Cryptococcus neoformans* демонстрируют высокую ГКП, несмотря на наличие гидрофильной капсулы. Различия в морфологии отдельных колоний дрожжей из одного и того же изолята могут быть связаны с различиями в ГКП. Эти различия в ГКП часто связаны с изменением вирулентности у патогенных грибов и могут влиять на эффективность противогрибковой терапии. *Cryptococcus neoformans* и *Cryptococcus gattii* – патогенные грибы, вызывающие значительную заболеваемость и смертность. В исследовании [12] было показано, что *C. neoformans* окружен полисахаридной капсулой, которая является высокогидрофильной и играет важную роль в определении вирулентности. В своем исследовании они сообщили о значительных различиях в гидрофобности некоторых штаммов *C. neoformans* и *C. gattii*. Капсульные полисахариды штаммов *C. neoformans* различаются по повторяющимся мотивам и, следовательно, по количеству гидроксильных групп, что, наряду со структурой капсулы более высокого порядка, может вносить вклад в различия в гидрофобности. Механизмы поддержания ГКП у патогенных грибов изучены недостаточно, но понимание этого фундаментального клеточного параметра важно для изучения его влияния на такие явления, как образование биопленок и вирулентность [13].

Различают два основных типа супергидрофобных поверхностей биопленок: «розоводобные», где капли жидкости прилипают при наклоне из-за сильного сцепления с поверхностью, и «лотосоводобные», где капли легко скатываются благодаря минимальному взаимодействию. Эти различия обусловлены структурой поверхности – в случае «лотоса» между каплей и биопленкой сохраняются микроскопические воздушные карманы, тогда как у «розы» жидкость контактирует непосредственно с поверхностью. Механизм гидрофобности биопленок *B. subtilis* связан с особенностями их матрицы, содержащей три ключевых компонента: гидрофобин (BslA), формирующий водоотталкивающее поверхностное покрытие; экзополисахариды, обеспечивающие структурную целостность; и волокна TasA, придающие механическую прочность. Комбинация химического состава (гидрофобные белки) и физической структуры (микро- и нанощероховатость) определяет устойчивость к смачиванию. В борьбе с биопленками традиционно используют ферментативное разрушение матрицы или применение антител и биологических макромолекул, однако эти методы дорогостоящи и специфичны для определенных штаммов. Более универсальным подходом является воздействие на гидрофобные свойства, например обработка концентрированными растворами солей или сахаров, что снижает водоотталкивающие свойства, но требует много времени (до 48 часов) и может вызывать побочные эффекты. Перспективным методом представляется использование ионов металлов: исследования показали, что низкие концентрации  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  снижают экспрессию генов, ответственных за формирование матрицы, изменяют топографию поверхности биопленки и увеличивают смачиваемость, делая биопленку уязвимой к антибиотикам. Важно отметить, что этот эффект наблюдается даже на зрелых биопленках, когда ионы металлов диффундируют через субстрат. Таким образом, регулирование гидрофобности поверхности биопленок, особенно с помощью ионов металлов в низких концентрациях, представляет собой экономичный и эффективный метод борьбы с биопленками как на ранних, так и на поздних стадиях их формирования [14].

### **Классификация гидрофобизаторов**

#### *Химические растворы*

Для защиты различных элементов от воды применяются гидрофобные растворы (гидрофобизаторы). В зависимости от способа применения гидрофобизаторы подразделяются на:

- поверхностно-активные;
- порошковые.

Порошковые гидрофобизаторы применяются при изготовлении материала в качестве добавки для сухих смесей. Они вносятся в составы и при добавлении воды активируются и вступают во взаимодействие с материалом. Затем частицы гидрофобизатора соединяются с поверхностью наполнителя и формируют водоотталкивающий слой.

Поверхностно-активные гидрофобизаторы обладают способностью изменять поверхностные свойства материала. Это растворы, которые при нанесении на материал образуют водоотталкивающую пленку, которая не пропускает воду внутрь.

#### *Биологические гидрофобизаторы*

Современные исследования выявили перспективность бактериальных штаммов в роли биологических гидрофобизаторов. В отличие от традиционных химических гидрофобизаторов (например,

силиконов или фторсодержащих соединений), биологические методы используют метаболическую активность микроорганизмов для создания устойчивых к воде поверхностей. Бактерии являются одним из основных и важнейших компонентов природной экосистемы, выполняющим значительную работу на макроуровне [15]. Они обитают в самых разных местах: от высоких гор до глубинных слоёв океана, от холодных ледяных земель до высокотемпературных вулканических регионов, демонстрируя уникальную адаптивность. Бактерии существуют либо в виде отдельных клеток (планктонных клеток), либо в виде биоплёнок – сложных трёхмерных многослойных структур, образованных множеством бактериальных клеток, которые выделяют внеклеточные полимерные вещества (ВПВ) на различных поверхностях [16].

Биоплёнки обладают рядом ключевых свойств, делающих их перспективными для гидрофобизации. Все биоплёнки имеют тенденцию к специфическому или неспецифическому взаимодействию с поверхностями, что обеспечивает прочную адгезию. Они состоят из внеклеточных полимерных веществ, создающих уникальную трёхмерную структуру с микросредой, подходящей для роста микроорганизмов [15, 17, 18].

В зависимости от условий биоплёнки приобретают различную архитектуру (грибовидную, плоскую, столбчатую) и обладают вязкоупругими свойствами, защищающими бактерии от механических воздействий. Важно, что гидрофобность микроорганизмов может варьироваться в зависимости от структуры их клеточной поверхности и условий среды, таких как температура, наличие питательных веществ и фаза роста [12, 19]. Например, у *Streptococcus pyogenes* экспрессия М-белков и наличие липотейхоевых кислот положительно коррелируют с гидрофобностью и образованием биоплёнок [18, 20, 21].

Как у химических, так и у биологических гидрофобизаторов есть свои преимущества и недостатки, определяющие сферу их применения. Химические покрытия отличаются высокой эффективностью и быстрым действием, обеспечивая мгновенную защиту от влаги, коррозии и микробов. Однако их существенный минус – токсичность, которая может негативно влиять на окружающую среду и здоровье человека, что ограничивает их использование в экологически ответственных проектах. Биологические гидрофобизаторы, такие как бактериальные биоплёнки, предлагают более устойчивое и природосовместимое решение. Их главные плюсы – способность к саморегенерации, экологичность и долговечность, поскольку они формируют естественный защитный барьер. Тем не менее такие покрытия требуют времени для образования, чувствительны к внешним условиям и работают медленнее, чем химические аналоги. Кроме того, рынок биологических гидрофобизаторов пока развит слабо, что затрудняет их массовое применение.

Таким образом, выбор между химическими и биологическими покрытиями зависит от конкретных задач: если нужна мгновенная защита, предпочтение отдаётся химическим составам, а если важны экологичность и долгосрочный эффект – биологическим, несмотря на их более сложные условия использования.

### **Отраслевое применение**

Среди наиболее перспективных направлений применения бактериальных гидрофобизаторов выделяют несколько ключевых подходов. Во-первых, это использование бактерий, продуцирующих биоплёнки с гидрофобными свойствами. Некоторые штаммы, такие как *Bacillus subtilis* и *Pseudomonas aeruginosa*, способны образовывать биоплёнки с выраженной гидрофобностью, которые могут применяться для покрытия строительных материалов, текстиля и древесины. Интересно, что у *B. subtilis* гидрофобность биоплёнки может регулироваться внешними факторами: добавление ионов меди или цинка делает супергидрофобные биоплёнки полностью смачиваемыми. Во-вторых, перспективно использование микробных липопептидов и ПАВ с гидрофобным эффектом [10, 22]. Бактерии рода *Bacillus* и *Streptomyces* производят липопептиды (например, сурфактин, итурин), которые помимо амфифильных свойств могут придавать поверхности длительную гидрофобность. Такие соединения экологически безопасны и могут применяться в «зелёной» химии [22]. *Pseudomonas putida* колонизирует корни растений, образуя биоплёнки, в которых белки LapA и LapF играют ключевую роль, причём LapA способен связываться как с гидрофильными, так и с гидрофобными поверхностями. Однако роль LapF в адгезии к гидрофобным субстратам остаётся неизученной, несмотря на его важность в формировании зрелой биоплёнки [23].

Особый интерес представляет гидрофобизация минеральных материалов через микробиологические процессы. Технология MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation) с использованием уретазных бактерий *Sporosarcina pasteurii* позволяет не только усиливать прочность бетона за счёт микробиологического окаменения, но и повышать его водоотталкивающие свойства благодаря образованию

карбонатных осадков на поверхности. Это открывает широкие возможности для применения в строительстве и реставрации памятников. Биогидрофобизаторы всё чаще рассматриваются как эффективная защита от капиллярного подсоса воды, что особенно важно для предотвращения разрушения камня и кирпича в условиях повышенной влажности.

Таким образом, бактериальные гидрофобизаторы представляют собой перспективную экологичную альтернативу традиционным химическим методам. Их преимущества включают биоразлагаемость, многофункциональность и возможность тонкой настройки свойств за счёт выбора конкретных штаммов микроорганизмов. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на оптимизацию подбора штаммов для конкретных материалов, повышение устойчивости биоплёнок к внешним воздействиям и разработку методов масштабирования технологий для промышленного применения [19, 12, 24].

#### *Металлы и сплавы*

Сверхгидрофобные растворы нашли своё применение в качестве средства борьбы с коррозией металла. Значительное внимание уделяется покрытию нержавеющей стали данным материалом. Даже с учётом своей высокой устойчивости к коррозии, нержавеющая сталь может подвергнуться пагубному воздействию воды [25]. Применение наиболее популярных способов защиты от коррозии, таких как: изменение химического состава материала, покрытие материалами с высокой химической стойкостью, применение ингибиторов коррозии, – затрудняется необходимостью сохранения структуры металла, его функциональности и внешних составляющих [26]. Сверхгидрофобное покрытие имеет значительное преимущество перед ранее используемыми методами за счёт возможности обеспечения надёжного антикоррозионного покрытия при минимальном последующем обслуживании.

Одной из основных проблем, касающихся элементов железнодорожного пути, является коррозия, которая является следствием воздействия атмосферных осадков, а также контакта с влагой и реагентами. Несмотря на то, что гидрофобные покрытия активно исследуются применительно к нержавеющей стали, их применение является перспективным для защиты элементов верхнего строения пути и металлоконструкций от коррозии. К таковым можно отнести: рельсовые скрепления, болты и шайбы и элементы стрелочных переводов. В то же время применение подобного рода покрытий ограничено на рабочей поверхности рельса в силу высокой интенсивности механического износа.

#### *Строительные материалы*

Гидрофобные растворы также применяются для обработки бетона в целях предотвращения разрушения и коррозии. Так как бетон сам по себе обладает гидрофильными и абсорбирующими свойствами из-за своей пористой структуры, ему необходима дополнительная защита от воды для продления срока службы. Обработка может происходить разными методами: покрытием, закупоркой пор и гидрофобной пропиткой. В первом случае на поверхность бетона наносится покрытие, представляющее собой сплошной защитный слой, который создаёт физический барьер на поверхности бетона. Во втором случае в процессе закупорки пор происходит их заполнение нерастворимыми соединениями, в результате чего снижается пористость поверхности и укрепляется верхний слой бетона. Самым распространённым средством для обработки пор является силикат натрия. При гидрофобной пропитке на внутренней поверхности материала образуется тонкая плёнка, которая придаёт ему водоотталкивающие свойства. Преимущество гидрофобной пропитки заключается в том, что она не воздействует на паро- и газопроницаемость бетона, предотвращая попадание в него воды, что позволяет материалу снижать внутреннюю влагу [27].

Гидрофобная обработка также применима к железобетону, так как основной причиной его разрушения является коррозия стальных элементов конструкции. Сама по себе сталь в бетоне находится в щелочной среде, поэтому не подвергается коррозии, так как на её поверхности образуется защитная плёнка. Однако увеличение количества проникаемого углекислого газа в структуру бетона или большое количество хлорид-ионов, которые могут попасть на бетон вследствие использования реагентов против гололёда или под воздействием морской воды, могут разрушить защитный слой [28]. В целях безопасной защиты железобетона от разрушения применяют наногидрофобные агенты в виде водной эмульсии. Данная добавка значительно снижает адсорбцию воды, а также подавляет перенос хлорид-ионов, за счёт уменьшения испарения воды [29].

В железнодорожном строительстве гидрофобная обработка бетона подходит прежде всего для искусственных сооружений, таких как: мосты, путепроводы, тоннели и водопропускные трубы, которые работают в условиях постоянного увлажнения. Применение гидрофобизаторов приведет к снижению водопоглощения, что замедлит процесс карбонизации и коррозии арматуры. В свою очередь для

железобетонных шпал пропитка может рассматриваться как дополнительная мера повышения морозостойкости, однако коррозия арматуры не является основным фактором их выхода из строя.

#### *Применение гидрофильных и гидрофобных микроорганизмов в обработке древесины*

Активно применяются гидрофобные покрытия для обработки древесины. Древесина – один из самых востребованных строительных материалов, однако её уязвимость к биоразложению и влаге требует эффективных методов защиты. Она является экологичным материалом и обладает хорошими прочностными характеристиками. Если не использовать специальную защиту от влаги, то со временем она теряет свою прочность и подвергается гниению. В частности, железнодорожные шпалы, уложенные в путь, должны подвергаться обязательной обработке. Несмотря на то, что в большинстве своём эксплуатируются железобетонные шпалы, деревянные шпалы все ещё необходимы для определённых отрезков пути с особыми эксплуатационными условиями. Наиболее популярными пропитывающими средствами являются: креозотовое масло, каменноугольное масло и другие маслянистые составы. Однако проблема существующих применяемых пропиток заключается в их высоком уровне токсичности. Поэтому применение креозота постепенно сокращается, но не искореняется полностью, так как он, благодаря своей токсичности, справляется с микроорганизмами, разрушающими древесину [30]. Для увеличения гидрофобности материала применяют также порошок из диоксида кремния, который является менее токсичным, чем креозот. При этом чем больше производится циклов пропитки, тем больше становится угол смачивания, а соответственно увеличивается гидрофобность древесины. Кроме того, уменьшается её теплопроводность, что делает древесину более устойчивой к огню [31].

Традиционные химические пропитки, такие как соединения меди и борные антисептики, обладают высокой эффективностью, но их экологическая безопасность вызывает вопросы. В связи с этим всё большее внимание уделяется биотехнологическим методам, основанным на использовании гидрофильных и гидрофобных микроорганизмов.

Гидрофильные микроорганизмы (например, бактерии рода *Bacillus* и *Pseudomonas*) способны подавлять рост дереворазрушающих грибов за счёт синтеза антимикробных соединений. Гидрофобные микроорганизмы (например, грибы *Trichoderma* и *Aspergillus*) могут формировать водоотталкивающие биоплёнки, снижая водопоглощение древесины. *Trichoderma* продуцирует гидрофобины – небольшие белки, образующие водоотталкивающие слои на поверхности древесины. Исследования показали, что обработка древесины культурой *T. viride* снижает её водопоглощение на 20–30%. *Aspergillus niger* синтезирует меланины – пигменты, обладающие гидрофобными свойствами. Комбинированное применение этих групп открывает новые возможности для создания экологичных и долговечных биопрпиток.

Бактерии *Rhodococcus opacus* продуцируют триацилглицериды и другие липиды, которые придают древесине водоотталкивающие свойства. Эксперименты показали, что обработка *R. opacus* снижает капиллярное водопоглощение на 25–40%.

Гидрофильные бактерии и грибы активно развиваются во влажной среде и могут использоваться для биоконсервации древесины. Их защитное действие основано на следующих механизмах: конкуренция за питательные вещества (некоторые микроорганизмы вытесняют патогены, лишая их ресурсов) и синтез антимикробных метаболитов (бактерии продуцируют вещества, подавляющие рост грибов и насекомых).

Например, бактерии рода *Bacillus* (*Bacillus subtilis* и *Bacillus amyloliquefaciens*) активно изучаются в качестве биозащитных агентов. Эти бактерии продуцируют липопептиды (сурфактин, итурин), которые обладают фунгицидной активностью против *Aspergillus*, *Penicillium* и других дереворазрушающих грибов. В исследовании, опубликованном в *International Biodeterioration & Biodegradation*, показано, что обработка древесины культурой *B. subtilis* снижает скорость её гниения на 40–60% по сравнению с необработанными образцами [32].

Бактерии *Pseudomonas fluorescens* синтезируют сидерофоры – соединения, связывающие железо и лишаящие патогенные грибы важного питательного элемента. Кроме того, *P. fluorescens* продуцирует феназины, подавляющие развитие бурой гнили (*Serpula lacrymans*) и других дереворазрушающих видов. Актиномицеты (*Streptomyces spp.*) известны своей способностью продуцировать антибиотики широкого спектра действия. Например, *Streptomyces griseus* синтезирует стрептомицин, эффективный против ряда грибов, вызывающих гниение древесины.

Также современные разработки направлены на создание комплексных составов, сочетающих гидрофильные и гидрофобные микроорганизмы. Например, *Bacillus subtilis* + *Trichoderma harzianum* – обеспечивает защиту от грибов и снижает водопоглощение. *Pseudomonas putida* + наноцеллюлоза – улучшает механическую прочность и гидрофобность.

Таким образом, использование гидрофильных и гидрофобных микроорганизмов открывает новые возможности для создания экологичных и эффективных средств защиты древесины, в частности, деревянных шпал. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию составов, повышение их устойчивости и разработку промышленных технологий нанесения.

### *Перспективы дальнейшего развития*

Необходимость защиты материалов от воздействия воды является распространённой проблемой во многих отраслях деятельности, включая железнодорожную инфраструктуру, элементы верхнего строения пути и искусственные сооружения. Применение гидрофобных растворов способствует значительному увеличению срока службы материалов, предотвращению коррозии и повышению их устойчивости к внешним воздействиям. Стоит отметить, что многочисленные исследования направлены на поиск и разработку именно экологичных гидрофобизаторов, так как большое количество существующих растворов и материалов обладают довольно высоким уровнем токсичности для окружающей среды. Наноструктурированные гидрофобные покрытия способствуют не только обеспечению достаточной влагозащиты, но и сохраняют основные эксплуатационные характеристики материалов. Дальнейшее исследование гидрофобных покрытий поможет изучить новые возможные сферы их применения, а также разработать более экологичные составы для минимизации вреда окружающей среде.

Современные исследования демонстрируют значительный потенциал гидрофильных и гидрофобных микроорганизмов для решения актуальных задач в различных областях науки и промышленности. В строительной индустрии особый интерес представляют работы по биозащите древесины. Исследование [33] подробно анализирует взаимосвязь между влажностью древесины и ее устойчивостью к грибковому разложению, предлагая новые подходы к биоконсервации. Важные результаты получены в работе [34], где систематизированы данные о взаимодействии древесины и дереворазрушающих грибов, а также рассмотрены современные методы биологической защиты.

Значительный прогресс достигнут в разработке биологических методов защиты строительных материалов. В работе [35] продемонстрировали эффективность использования антагонистических микроорганизмов против дереворазрушающих грибов, что открывает перспективы создания экологически безопасных консервантов. Практическое применение этих технологий показано в исследовании [36], где комбинация силанов и борной кислоты с биологическими компонентами продемонстрировала высокую эффективность против грибов и насекомых-вредителей. Перспективным направлением является разработка биогидрофобных составов, способных частично заменить токсичные креозотсодержащие пропитки, что особенно актуально на участках железнодорожного пути, где до сих пор эксплуатируются деревянные шпалы.

Дальнейшее развитие технологий сверхгидрофобных покрытий в отношении металлов и сплавов связано с их адаптацией к условиям эксплуатации железнодорожной инфраструктуры. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку износостойких антикоррозионных покрытий для элементов верхнего строения пути – рельсовых скреплений, болтовых соединений, шайб и элементов стрелочных переводов, работающих в условиях воздействия атмосферных осадков, влаги и противогололёдных реагентов.

Особое внимание должно быть уделено повышению адгезии покрытий к металлической поверхности и их устойчивости к динамическим нагрузкам. При этом применение сверхгидрофобных составов на рабочей поверхности рельса требует дальнейших исследований ввиду высокой интенсивности механического износа, что на данном этапе ограничивает их использование в зоне контакта колеса и рельса.

В области строительных материалов перспективы связаны с совершенствованием методов гидрофобной обработки бетона и железобетона, направленных на снижение водопоглощения и ограничение переноса агрессивных веществ в структуру материала. Актуальным направлением является оптимизация составов гидрофобных пропиток и наногидрофобных агентов, обеспечивающих уменьшение проникновения хлорид-ионов и замедление процессов карбонизации при сохранении паропроницаемости бетона.

Для объектов железнодорожного строительства – мостов, путепроводов, тоннелей и водопропускных сооружений – дальнейшие исследования должны быть направлены на оценку долговечности гидрофобных покрытий в условиях постоянного увлажнения и циклического замораживания и оттаивания. В отношении железобетонных шпал перспективным является изучение влияния гидрофобной пропитки на повышение морозостойкости и снижение водонасыщения бетона как дополнительной меры увеличения срока службы.

## Список литературы

- 1 **Войтович, В. А.** Пособие по гидрофобизации строительных конструкций и изделий : учебно-методическое пособие / В. А. Войтович, И. Н. Хряпченкова ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2016. – 45 с.
- 2 **Buczkowska, K.** Hydrophobic protection for building materials / K. Buczkowska // *Superhydrophobic Coating-Recent Advances in Theory and Applications*. – IntechOpen, 2023.
- 3 Comparison of methods to detect biosurfactant production by diverse microorganisms. *Journal of Microbiological Methods* / N. H. Youssef, K. E. Duncan, M. J. McInerney, M. J. Folmsbee. – 2004. – 56 (3). – P. 339–347. – DOI 10.1016/j.mimet.2003.11.001.
- 4 Adhesion behavior of Escherichia coli strains on glass : Role of cell surface qualitative and quantitative hydrophobicity in their attachment ability / K. Elfazazi, H. Zahir, S. Tankiouine [et al.] // *International Journal of Microbiology*. – 2021. – P. 1–9. – DOI 10.1155/2021/5580274.
- 5 The role of bacterial cell wall hydrophobicity in adhesion / M. C. M. van Loosdrecht, J. Lyklema, W. Norde [et al.] // *Applied and Environmental Microbiology* 1987. – 53 (8). – P. 1893–1897.
- 6 Bacterial and fungal composition and exometabolites control the development and persistence of soil water repellency / E. N. Boak, B. P. Bowen, K. B. Louie [et al.] // *ISME Communications*. – 2025. – 5 (1). – DOI 10.1093/ismeco/ycaf084.
- 7 **Гетьман, Л. П.** Магистерская диссертация : Экспериментальная оценки эффективности гидрофобизации каменных материалов / Л. П. Гетьман. – Тольятти : Тольяттинский государственный университет, 2017. – 110 с.
- 8 **Marmur, A.** Solid-Surface Characterization by Wetting / A. Marmur // *Annual Review of Materials Research*. – 2009. – Vol. 39 (1). – P. 473–489.
- 9 **Родионова, Л. Д.** Применение гидрофобных и супергидрофобных покрытий для защиты от коррозии / Л. Д. Родионова, В. А. Брыксина // *Державинский форум*. – 2020. – Т. 4, № 16. – С. 154–162.
- 10 **Beshiru, A.** Biofilm formation and potential virulence factors of Salmonella strains isolated from ready-to-eat shrimps / A. Beshiru, I. H. Igbinosa, E. O. Igbinosa // *PLoS One*. – 2018. – Sep 20 ; 13 (9) : e0204345. – DOI 10.1371/journal.pone.0204345.
- 11 **Danchik, C.** Role of Cell Surface Hydrophobicity in the Pathogenesis of Medically-Significant Fungi / C. Danchik, A. Casadevall // *Front. Cell. Infect. Microbiol.* – 2021. – DOI 10.3389/fcimb.2020.594973.
- 12 Variation in cell surface hydrophobicity among

## References

- 1 **Voytovich, V. A.** Manual on hydrophobization of building structures and products : educational and methodical manual / V. A. Voytovich, I. N. Khryapchenkova ; Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. – Nizhny Novgorod : NNGASU, 2016. – 45 p.
- 2 **Buczkowska, K.** Hydrophobic protection for building materials / K. Buczkowska // *Superhydrophobic Coating-Recent Advances in Theory and Applications*. – IntechOpen, 2023.
- 3 Comparison of methods to detect biosurfactant production by diverse microorganisms. *Journal of Microbiological Methods* / N. H. Youssef, K. E. Duncan, M. J. McInerney, M. J. Folmsbee. – 2004. – 56 (3). – P. 339–347. – DOI 10.1016/j.mimet.2003.11.001.
- 4 Adhesion behavior of Escherichia coli strains on glass : Role of cell surface qualitative and quantitative hydrophobicity in their attachment ability / K. Elfazazi, H. Zahir, S. Tankiouine [et al.] // *International Journal of Microbiology*. – 2021. – P. 1–9. – DOI 10.1155/2021/5580274.
- 5 The role of bacterial cell wall hydrophobicity in adhesion / M. C. M. van Loosdrecht, J. Lyklema, W. Norde [et al.] // *Applied and Environmental Microbiology* 1987. – 53 (8). – P. 1893–1897.
- 6 Bacterial and fungal composition and exometabolites control the development and persistence of soil water repellency / E. N. Boak, B. P. Bowen, K. B. Louie [et al.] // *ISME Communications*. – 2025. – 5 (1). – DOI 10.1093/ismeco/ycaf084.
- 7 **Getman, L. P.** Master's thesis : experimental evaluation of the effectiveness of hydrophobization of stone materials / L. P. Getman. – Tolyatti : Tolyatti State University, 2017. – 110 p.
- 8 **Marmur, A.** Solid-Surface Characterization by Wetting / A. Marmur // *Annual Review of Materials Research*. – 2009. – Vol. 39 (1). – P. 473–489.
- 9 **Rodionova, L. D.** Application of hydrophobic and superhydrophobic coatings for corrosion protection / L. D. Rodionova, V. A. Bryksina // *Derzhavin Forum*. – 2020. – Vol. 4, No. 16. – P. 154–162.
- 10 **Beshiru, A.** Biofilm formation and potential virulence factors of Salmonella strains isolated from ready-to-eat shrimps / A. Beshiru, I. H. Igbinosa, E. O. Igbinosa // *PLoS One*. – 2018. – Sep 20 ; 13 (9) : e0204345. – DOI 10.1371/journal.pone.0204345.
- 11 **Danchik, C.** Role of Cell Surface Hydrophobicity in the Pathogenesis of Medically-Significant Fungi / C. Danchik, A. Casadevall // *Front. Cell. Infect. Microbiol.* – 2021. – DOI 10.3389/fcimb.2020.594973.
- 12 Variation in cell surface hydrophobicity among

Cryptococcus neoformans strains influences interactions with amoebas / R. Vij, C. Danchik, C. Crawford [et al.]. – 2020. – DOI 10.1128/mSphere.00310-20.

13 SCOPY Cellulose-Based Materials Hydrophobized Using Stearic Acid and Apple Powder / M. A. Bryszewska, D. G. Pareja, L. Kaczmarek [et al.] // Int. J. Mol. Sci. 2024, 25, 13746. – DOI 10.3390/ijms252413746.

14 Metal ions weaken the hydrophobicity and antibiotic resistance of *Bacillus subtilis* / C. Falcón García, M. Kretschmer, C. N. Lozano-Andrade [et al.] // NCIB 3610 biofilms. npj Biofilms Microbiomes 6, 1 (2020). – DOI 10.1038/s41522-019-0111-8.

15 Bacterial biofilm shows persistent resistance to liquid wetting and gas penetration / A. K. Epstein, B. Pokroy, A. Seminara, J. Aizenberg // PNAS. – January 18, 2011. – Vol. 108, No. 3. – P. 997. – DOI 10.1073/pnas.1011033108.

16 **Kobayashi, K.** BslA(YuaB) forms a hydrophobic layer on the surface of *Bacillus subtilis* / K. Kobayashi, M. Iwano // Molecular Microbiology. – 2012. – 85 (1). – P. 51–66. – DOI 10.1111/j.1365-2958.2012.08094.

17 **Joshi, A. S.** Interactions of Gold and Silver Nanoparticles with Bacterial Biofilms / A. S. Joshi, P. Singh, I. Mijakovic // Molecular Interactions behind Inhibition and Resistance. Int. J. Mol. Sci. 2020, 21, 7658. – DOI 10.3390/ijms21207658.

18 The biofilm life cycle : expanding the conceptual model of biofilm formation / K. Sauer, P. Stoodley, D. M. Goeres, [et al.] // Nat Rev Microbiol 20, 608–620 (2022). – DOI 10.1038/s41579-022-00767-0.

19 Floating and Tether-Coupled Adhesion of Bacteria to Hydrophobic and Hydrophilic Surfaces / R. van der Westen, J. Sjollema, R. Molenaar [et al.] // Langmuir. – 2018. – 34. – P. 4937–4944. – DOI 10.1021/acs.langmuir.7b04331.

20 **Arnauteli, S.** Just in case it rains : building a hydrophobic biofilm the *Bacillus subtilis* way / S. Arnauteli, C. E. MacPhee, N. R. Stanley-Wall // Current Opinion in Microbiology. – 2016. – Vol. 34. – P. 7–12. – DOI 10.1016/j.mib.2016.07.012.

21 Relationship between Expression of the Family of M Proteins and Lipoteichoic Acid to Hydrophobicity and Biofilm Formation in *Streptococcus pyogenes* / H. S. Courtney, I. Ofek, T. Penfound [et al.]. – 2009. – DOI 10.1371/journal.pone.0004166.

22 *Lactobacillus plantarum* : Effect of a protective biofilm on the surface of olives during storage / K. Faten, K. Hamida, E. A. Soumya [et al.] // Sociedade Brasileira de Microbiologia. – 2015. – DOI 10.1016/j.bjm.2015.11.028.

23 LapF and Its Regulation by Fis Affect the Cell Surface Hydrophobicity of *Pseudomonas putida* /

*Cryptococcus neoformans* strains influences interactions with amoebas / R. Vij, C. Danchik, C. Crawford [et al.]. – 2020. – DOI 10.1128/mSphere.00310-20.

13 SCOPY Cellulose-Based Materials Hydrophobized Using Stearic Acid and Apple Powder / M. A. Bryszewska, D. G. Pareja, L. Kaczmarek [et al.] // Int. J. Mol. Sci. 2024, 25, 13746. – DOI 10.3390/ijms252413746.

14 Metal ions weaken the hydrophobicity and antibiotic resistance of *Bacillus subtilis* / C. Falcón García, M. Kretschmer, C. N. Lozano-Andrade [et al.] // NCIB 3610 biofilms. npj Biofilms Microbiomes 6, 1 (2020). – DOI 10.1038/s41522-019-0111-8.

15 Bacterial biofilm shows persistent resistance to liquid wetting and gas penetration / A. K. Epstein, B. Pokroy, A. Seminara, J. Aizenberg // PNAS. – January 18, 2011. – Vol. 108, No. 3. – P. 997. – DOI 10.1073/pnas.1011033108.

16 **Kobayashi, K.** BslA(YuaB) forms a hydrophobic layer on the surface of *Bacillus subtilis* / K. Kobayashi, M. Iwano // Molecular Microbiology. – 2012. – 85 (1). – P. 51–66. – DOI 10.1111/j.1365-2958.2012.08094.

17 **Joshi, A. S.** Interactions of Gold and Silver Nanoparticles with Bacterial Biofilms / A. S. Joshi, P. Singh, I. Mijakovic // Molecular Interactions behind Inhibition and Resistance. Int. J. Mol. Sci. 2020, 21, 7658. – DOI 10.3390/ijms21207658.

18 The biofilm life cycle : expanding the conceptual model of biofilm formation / K. Sauer, P. Stoodley, D. M. Goeres, [et al.] // Nat Rev Microbiol 20, 608–620 (2022). – DOI 10.1038/s41579-022-00767-0.

19 Floating and Tether-Coupled Adhesion of Bacteria to Hydrophobic and Hydrophilic Surfaces / R. van der Westen, J. Sjollema, R. Molenaar [et al.] // Langmuir. – 2018. – 34. – P. 4937–4944. – DOI 10.1021/acs.langmuir.7b04331.

20 **Arnauteli, S.** Just in case it rains : building a hydrophobic biofilm the *Bacillus subtilis* way / S. Arnauteli, C. E. MacPhee, N. R. Stanley-Wall // Current Opinion in Microbiology. – 2016. – Vol. 34. – P. 7–12. – DOI 10.1016/j.mib.2016.07.012.

21 Relationship between Expression of the Family of M Proteins and Lipoteichoic Acid to Hydrophobicity and Biofilm Formation in *Streptococcus pyogenes* / H. S. Courtney, I. Ofek, T. Penfound [et al.]. – 2009. – DOI 10.1371/journal.pone.0004166.

22 *Lactobacillus plantarum* : Effect of a protective biofilm on the surface of olives during storage / K. Faten, K. Hamida, E. A. Soumya [et al.] // Sociedade Brasileira de Microbiologia. – 2015. – DOI 10.1016/j.bjm.2015.11.028.

23 LapF and Its Regulation by Fis Affect the Cell Surface Hydrophobicity of *Pseudomonas putida* /

- A. Lahesaare, H. Ainelo, A. Teppo [et al.] // PLoS ONE 11 (11) : e0166078. – 2016. – DOI 10.1371/journal.pone.0166078.
- 24 Contribution of Spores to the Ability of *Clostridium difficile* To Adhere to Surfaces / L. T. Joshi, D. S. Phillips, C. F. Williams [et al.] // Appl Environ Microbiol-78. – 2012. – DOI 10.1128/AEM.01862-12.
- 25 **Emelyanenko, K. A.** Laser obtained superhydrophobic state for stainless steel corrosion protection, a review / K. A. Emelyanenko, A. M. Emelyanenko, L. B. Boinovich // Coatings. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 194.
- 26 **Avdeev, Ya. G.** Inhibitory protection of steels from high-temperature corrosion in acid solutions. A review. Part 1 / Ya. G. Avdeev, Yu. I. Kuznetsov // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2020. – Vol. 9, No. 2. – P. 394–426. – DOI 10.17675/2305-6894-2020-9-2-2.
- 27 Recent advances in hydrophobic and icephobic surface treatments of concrete / R. Di Mundo [et al.] // Coatings. – 2020. – Vol. 10, No. 5. – P. 449.
- 28 Influence of a nano-hydrophobic admixture on concrete durability and steel corrosion / J. Cai [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 19. – P. 6842.
- 29 Hydrophobic or superhydrophobic modification of cement-based materials : A systematic review / J. Zhao [et al.] // Composites Part B : Engineering. – 2022. – Vol. 243. – P. 110104.
- 30 Incising and Double Impregnation of Beech Sleepers-Investigation of an Alternative Preservation System for Wooden Railway Sleepers / M. Starck [et al.] // Frontiers in Forests and Global Change. – 2022. – Vol. 5. – P. 814049.
- 31 Thermal insulation and hydrophobization of wood impregnated with silica aerogel powder / H. Chen [et al.] // Journal of Wood Science. – 2020. – Vol. 66. – P. 1–11.
- 32 The triterpenoid curcumene mediates the relative hydrophilicity of *Bacillus subtilis* spores / S. Castaldi, G. Donadio, I. Staiano [et al.]. – DOI 10.1128/mbio.03024-24.
- 33 **Brischke, C.** Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay / C. Brischke, G. Alfredsen // Applied Microbiology and Biotechnology, 104 (9), 3781–3795. – 2020. – DOI 10.1007/s00253-020-10479-1.
- 34 **Schmidt, O.** Wood and Tree Fungi / O. Schmidt // Biology, Damage, Protection and Use. Springer, Berlin. – 2006. – URL: <https://www.springer.com/gp/book/9783540321385>.
- 35 Biological control of wood decay fungi using antagonistic microorganisms / D. Jones [et al.] // Forest Products Journal. – 2020. – 70 (2). – P. 136–145. – DOI 10.13073/FPJ-D-19-00054.
- 36 A wood treatment based on siloxanes and boric
- A. Lahesaare, H. Ainelo, A. Teppo [et al.] // PLoS ONE 11 (11) : e0166078. – 2016. – DOI 10.1371/journal.pone.0166078.
- 24 Contribution of Spores to the Ability of *Clostridium difficile* To Adhere to Surfaces / L. T. Joshi, D. S. Phillips, C. F. Williams [et al.] // Appl Environ Microbiol-78. – 2012. – DOI 10.1128/AEM.01862-12.
- 25 **Emelyanenko, K. A.** Laser obtained superhydrophobic state for stainless steel corrosion protection, a review / K. A. Emelyanenko, A. M. Emelyanenko, L. B. Boinovich // Coatings. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 194.
- 26 **Avdeev, Ya. G.** Inhibitory protection of steels from high-temperature corrosion in acid solutions. A review. Part 1 / Ya. G. Avdeev, Yu. I. Kuznetsov // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2020. – Vol. 9, No. 2. – P. 394–426. – DOI 10.17675/2305-6894-2020-9-2-2.
- 27 Recent advances in hydrophobic and icephobic surface treatments of concrete / R. Di Mundo [et al.] // Coatings. – 2020. – Vol. 10, No. 5. – P. 449.
- 28 Influence of a nano-hydrophobic admixture on concrete durability and steel corrosion / J. Cai [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 19. – P. 6842.
- 29 Hydrophobic or superhydrophobic modification of cement-based materials : A systematic review / J. Zhao [et al.] // Composites Part B : Engineering. – 2022. – Vol. 243. – P. 110104.
- 30 Incising and Double Impregnation of Beech Sleepers-Investigation of an Alternative Preservation System for Wooden Railway Sleepers / M. Starck [et al.] // Frontiers in Forests and Global Change. – 2022. – Vol. 5. – P. 814049.
- 31 Thermal insulation and hydrophobization of wood impregnated with silica aerogel powder / H. Chen [et al.] // Journal of Wood Science. – 2020. – Vol. 66. – P. 1–11.
- 32 The triterpenoid curcumene mediates the relative hydrophilicity of *Bacillus subtilis* spores / S. Castaldi, G. Donadio, I. Staiano [et al.]. – DOI 10.1128/mbio.03024-24.
- 33 **Brischke, C.** Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay / C. Brischke, G. Alfredsen // Applied Microbiology and Biotechnology, 104 (9), 3781–3795. – 2020. – DOI 10.1007/s00253-020-10479-1.
- 34 **Schmidt, O.** Wood and Tree Fungi / O. Schmidt // Biology, Damage, Protection and Use. Springer, Berlin. – 2006. – URL: <https://www.springer.com/gp/book/9783540321385>.
- 35 Biological control of wood decay fungi using antagonistic microorganisms / D. Jones [et al.] // Forest Products Journal. – 2020. – 70 (2). – P. 136–145. – DOI 10.13073/FPJ-D-19-00054.
- 36 A wood treatment based on siloxanes and boric

acid against fungal decay and coleopter *Hylotrupes bajulus* / S. Palanti [et al.] // *International Biodeterioration & Biodegradation*. – 2012. – No. 75. – P. 49–54. – DOI 10.1016/j.ibiod.2012.03.012.

acid against fungal decay and coleopter *Hylotrupes bajulus* / S. Palanti [et al.] // *International Biodeterioration & Biodegradation*. – 2012. – No. 75. – P. 49–54. – DOI 10.1016/j.ibiod.2012.03.012.

*T. R. Kadyrov, T. V. Nuzhnaya, Yu. A. Polagutina, E. Kh. Khalitova*

### MODERN METHODS OF MATERIAL HYDROPHOBIZATION: CHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL SOLUTIONS FOR RAILWAY INFRASTRUCTURE

**Abstract.** The article presents a review of modern methods of material hydrophobization aimed at increasing the durability and reliability of railway infrastructure elements under conditions of moisture exposure and aggressive environmental factors. The principles of hydrophobic coating formation, the mechanisms of action of hydrophobic solutions, and methods for assessing hydrophobicity using the contact angle measurement are considered. Particular attention is paid to microbiological approaches to hydrophobization based on the use of microorganisms and the biopolymers synthesized by them. The areas of practical application of hydrophobic materials in protecting metal structures, concrete and reinforced concrete elements, as well as track superstructure materials from corrosion, moisture saturation, and bio-deterioration are analyzed. The environmental aspects of using biosurfactants and the prospects for implementing environmentally friendly hydrophobic coatings in the railway industry are also discussed.

**Keywords:** material hydrophobization, railway infrastructure, hydrophobic coatings, track superstructure materials, contact angle, microbiological methods, biosurfactants, moisture protection, environmentally friendly technologies.

**For citation:** Modern methods of material hydrophobization: chemical and microbiological solutions for railway infrastructure / T. R. Kadyrov, T. V. Nuzhnaya, Yu. A. Polagutina, E. Kh. Khalitova // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*. – 2026. – No. 1. – P. 8–19. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_8.

#### Сведения об авторах

##### Кадыров Тимур Радикович

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), кафедра «Железнодорожный путь и строительство», старший преподаватель, e-mail: t.kadyrov@samgups.ru

##### Нужная Татьяна Владимировна

Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, Уфимский институт биологии Уфимского Федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, e-mail: tanyawww89@mail.ru

##### Полагутина Юлия Анатольевна

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), кафедра «Железнодорожный путь и строительство», студент 5-го курса, e-mail: yu.polagutina@samgups.ru

#### Information about the authors

##### Kadyrov Timur Radikovich

Volga State Transport University (PrivSTU), Chair “Railway Track and Construction”, Senior Lecturer, e-mail: t.kadyrov@samgups.ru

##### Nuzhnaya Tatyana Vladimirovna

Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla, Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, e-mail: tanyawww89@mail.ru

##### Polagutina Yulia Anatolievna

Privolzhsky State Transport University (PrivSTU), Chair “Railway Track and Construction”, 5th Year Student, e-mail: yu.polagutina@samgups.ru

**Халитова Эльза Хафизовна**  
Башкирский государственный  
педагогический университет  
им. М. Акмуллы,  
кандидат биологических наук,  
заведующая научной лабораторией  
«Биотехнология живых систем»,  
e-mail: elza817@mail.ru

**Khalitova Elza Khafizovna**  
Bashkir State Pedagogical University named  
after M. Akmulla,  
Candidate of Biological Sciences, Head of  
the Scientific Laboratory “Biotechnology of  
Living Systems”,  
e-mail: elza817@mail.ru

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,  
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 004.4 + 06

DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_20

*И. О. Алымов***АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ БАЗОВЫХ АРХИТЕКТУР НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ  
В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ**

**Аннотация.** Рассмотрен подход к повышению эффективности автоматизированных систем управления движением поездов путем интеграции нейросетевого модуля-ассистента в контур подсистемы автоматического блокирующего логического контроля (АБЛК). Выполнен анализ применимости различных архитектур нейронных сетей для решения задач интеллектуальной поддержки поездного диспетчера, включая многослойный перцептрон (*MLP*) и рекуррентные сети с долгой краткосрочной памятью (*LSTM*). На основе имитационной модели диспетчерского участка, включающего три станции, проведена количественная оценка размерности входного вектора состояния и вычислительной сложности рассматриваемых архитектур. Представлены формулы расчета количества обучаемых параметров, выполнено сравнение *MLP* и *LSTM* при одинаковых параметрах модели. Результаты сравнительного анализа демонстрируют преимущество *LSTM* с точки зрения вычислительной эффективности при сохранении структуры временных зависимостей. На основании полученных результатов обоснован выбор *LSTM* в качестве базовой архитектуры для построения интеллектуального ассистента, работающего в едином контуре с подсистемой АБЛК.

**Ключевые слова:** автоматизированные системы управления движением поездов, диспетчерская централизация, интеллектуальные системы поддержки принятия решений, активный блокирующий логический контроль, нейронные сети, *LSTM*, многослойный перцептрон (*MLP*).

**Для цитирования:** Алымов, И. О. Анализ параметров базовых архитектур нейронных сетей в транспортных системах управления / И. О. Алымов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 20–27. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_20.

**Введение**

Современные автоматизированные системы управления движением поездов, такие как системы диспетчерской централизации (ДЦ), являются критически важным элементом для обеспечения перевозочного процесса. Рост интенсивности перевозочного процесса закономерно приводит к увеличению психоэмоциональной нагрузки на оперативный персонал, повышая риски, связанные с «человеческим фактором» [1, 2]. Это особенно актуально в случаях возникновения сложной поездной обстановки или нештатных ситуаций в работе устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ).

Эффективным технологическим решением данной проблемы стало внедрение в состав современных систем ДЦ подсистемы автоматического блокирующего логического контроля (АБЛК). Как отмечено в работе [3], АБЛК представляет собой программный модуль, выполняющий функции активного контроля и блокировки. Его основное назначение заключается в том, чтобы в режиме реального времени выявлять логические несоответствия в работе устройств электрической централизации (ЭЦ) и автоблокировки (АБ), а также блокировать некорректные управляющие команды, формируемые на АРМ ДНЦ. Функционал АБЛК включает: блокировку выполнения недопустимых или требующих подтверждения команд, контроль принципа единоначалия, логическое обнаружение несоответствий зависимостей ЭЦ и АБ, протоколирование всех событий и формирование предупреждений для персонала. АБЛК реализует функцию детерминированного логического барьера, программно исключая возможность исполнения управляющих команд, которые не соответствуют формализованным условиям безопасности и технологическим зависимостям устройств ЭЦ и АБ. Успешный опыт эксплуатации АБЛК, в частности на полигоне Сочи – Адлер – Красная Поляна Северо-Кавказской железной дороги в период Олимпиады 2014 года, подтвердил его высокую эффективность.

### Основная часть

Разрабатываемая нейросетевая модель представляет собой интеллектуальный ассистент поездного диспетчера (ДНЦ), работающий в едином контуре с подсистемой АБЛК. Ее основная задача – анализировать текущую оперативную обстановку на диспетчерском участке и предлагать диспетчеру оптимальные последовательности команд, которые заранее гарантированно проходят проверки АБЛК, тем самым повышая маневренность и гибкость управления без снижения уровня безопасности.

Общую логику работы системы можно представить как слаженное взаимодействие двух компонентов: нейросети-ассистента (прогнозирующий и оптимизирующий блок) и подсистемы АБЛК (верифицирующий и защитный блок). Нейросеть непрерывно анализирует тот же поток дискретных сигналов о состоянии элементов ЖАТ (рельсовых цепей, стрелок, светофоров), что и АБЛК, формируя целостную ситуационную модель. На ее основе генерируются рекомендации – наиболее рациональные последовательности действий. Ключевой этап – обязательная верификация каждой предложенной командной последовательности алгоритмами АБЛК. Только варианты, получившие формальное подтверждение на соответствие всем зависимостям и правилам безопасности, передаются поездному диспетчеру для выбора и исполнения.

Таким образом, нейросеть не отменяет и не обходит блокировки АБЛК, а превосходит успешный результат, экономя время диспетчера на рутинный перебор и проверку вариантов. Это превращает АБЛК из инструмента пассивного контроля в элемент интеллектуальной системы, способствующей быстрому нахождению правильных и безопасных решений.

Определение оптимальной архитектуры нейронной сети является ключевым этапом проектирования интеллектуального модуля-ассистента. Выбор должен учитывать специфику входных данных, характер решаемой задачи, а также требования к устойчивости работы, достоверности результатов и интерпретируемости решений, предъявляемые к интеллектуальному модулю в контуре взаимодействия с АБЛК.

На первых этапах разработки нейросетевого модуля подсистемы АБЛК входными данными для модуля служат исключительно дискретные сигналы о состоянии объектов систем ЖАТ на диспетчерском участке: занятость рельсовых цепей, положение стрелок, показания светофоров. Этот набор представляет собой структурированный вектор высокой размерности – на крупном диспетчерском участке количество таких сигналов может достигать нескольких сотен тысяч, каждый из которых кодируется как отдельный признак. Данный вектор является цифровым «снимком» диспетчерского участка: он с высокой детализацией фиксирует состояние всех объектов ЖАТ в текущий момент времени. С точки зрения задачи нейросеть должна оценить этот «снимок» и предложить одну или несколько допустимых и целесообразных управляющих команд. Рассмотрим два базовых класса архитектур.

Многослойный перцептрон (*MLP*). Данная классическая архитектура, состоящая из последовательности полносвязных слоёв, обрабатывает единичный входной вектор. Структурная схема многослойного перцептрона представлена на рис. 1.

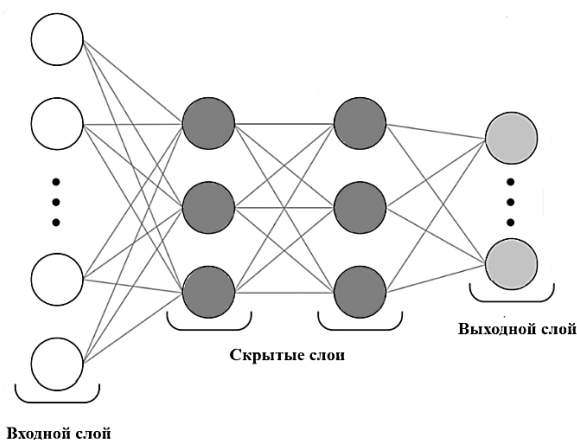


Рис. 1. Структурная схема многослойного перцептрона

Ключевое преимущество *MLP* – способность выявлять сложные нелинейные зависимости между любыми сигналами в фиксированный момент времени, что хорошо подходит для задач классификации «по состоянию на сейчас». *MLP* проста для реализации и обеспечивает высокую скорость вывода, будучи эффективной для воспроизведения формальной логики, подобной алгоритмам АБЛК.

Однако её фундаментальным ограничением является полное отсутствие контекстной памяти [4]. *MLP* не учитывает, как система пришла в текущее состояние, игнорируя временные зависимости и последовательности событий, что критически важно для моделирования динамических процессов управления движением.

Рекуррентные нейронные сети (*RNN*) и их модификации, в частности сети с долгой краткосрочной памятью (*LSTM*), специально созданы для обработки последовательных данных. Структурная схема рекуррентной нейронной сети представлена на рис. 2.

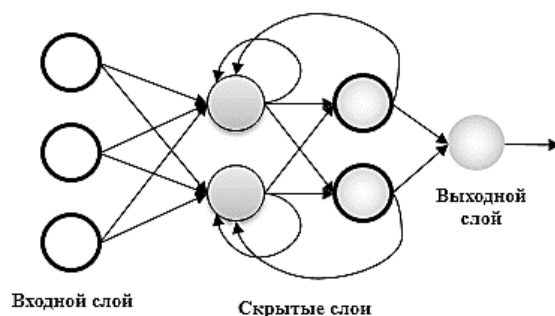


Рис. 2. Структурная схема рекуррентной нейронной сети

Ключевое достоинство *RNN* – наличие внутренней памяти, позволяющей модели учитывать не только текущее состояние, но и предысторию: порядок событий, последовательность занятия рельсовых цепей, историю команд. Это критически важно для прогнозирования развития поездной обстановки. Сети с долгой краткосрочной памятью (*LSTM*) являются предпочтительными благодаря своей устойчивости к проблеме затухающего градиента [5] и способности эффективно обучаться на длинных временных зависимостях, характерных для железнодорожного графика. К недостаткам можно отнести большую вычислительную сложность и необходимость подготовки данных в виде временных рядов.

Проведенный анализ преимуществ и недостатков различных архитектур нейронных сетей требует количественного подтверждения на основе реальных параметров диспетчерского участка. Ниже представлены результаты расчетов размерности входного вектора состояния и вычислительной сложности рассматриваемых моделей.

Количественная оценка обучаемых параметров выполнена на базе имитационной модели работы диспетчерского участка, включающего три станции: «Узловая», «Разъезд 33» и «Разъезд 44» с однопутными перегонами. Информационный фрагмент имитационной модели участка представлен на рис. 3.

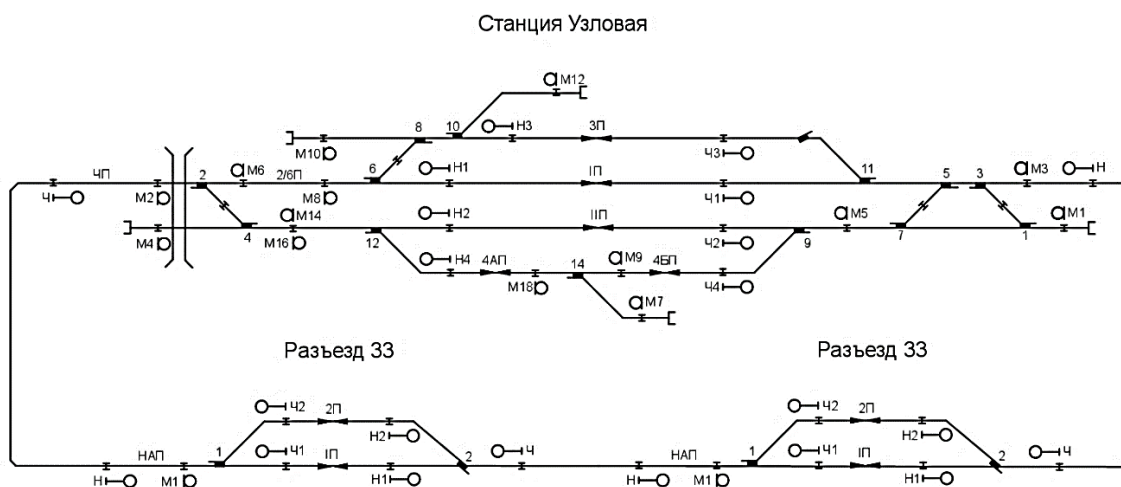


Рис. 3. Информационный фрагмент имитационной модели диспетчерского участка

Характеристики оснащения станций устройствами железнодорожной автоматики приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Оснащение станций смоделированного диспетчерского участка устройствами ЖАТ

Станция	Устройства ЖАТ				
	Рельсовые цепи	Светофоры	Стрелки	УКСПС	Переезд
Узловая	19 (в том числе 4 приемо-отправочных пути)	24	14	2	1
Разъезд 33	5 (в том числе 2 приемо-отправочных пути)	7	2	2	0
Разъезд 44	5 (в том числе 2 приемо-отправочных пути)	7	2	2	0

Для корректного формирования вектора дискретных данных необходимо определить перечень контролируемых состояний для каждого типа объектов. Соответствующие данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

### Контролируемые состояния объектов ЖАТ

Объект	Контролируемые состояния	Количество
Рельсовая цепь	Свободна/занята/замкнута/искусственно размыкается	4
Стрелка	Плюсовой контроль/минусовой контроль/отсутствие контроля/индивидуально замкнута/индивидуально разомкнута	5
Светофор	Разрешающее показание/запрещающее состояние/неисправность	3
Переезд	Открыт/закрыт/неисправность	3
УКСПС	Исправность устройств/срабатывание устройств	2

Представленный набор объектов и их состояний обеспечивает достаточную полноту модели для оценки вычислительной сложности нейросетевых архитектур в условиях, приближенных к реальным.

Общая размерность входного вектора  $D$  состояния для всего участка определяется по формуле

$$D = \sum_{s \in S} \left( N_{rc}^{(s)} \cdot K_{rc} + N_{sv}^{(s)} \cdot K_{sv} + N_{st}^{(s)} \cdot K_{st} + N_{uksps}^{(s)} \cdot K_{uksps} + N_{pr}^{(s)} \cdot K_{pr} \right), \quad (1)$$

где  $S$  – множество станций участка;  $N_{rc}^{(s)}, N_{sv}^{(s)}, N_{st}^{(s)}, N_{uksps}^{(s)}, N_{pr}^{(s)}$  – количество соответствующих объектов (рельсовая цепь, светофор, стрелка, УКСПС, переезд соответственно) на станции  $s$ ;  $K_{rc}, K_{sv}, K_{st}, K_{uksps}, K_{pr}$  – число состояний для каждого типа объектов (рельсовая цепь, светофор, стрелка, УКСПС, переезд соответственно).

Подставляя данные из табл. 1 и 2 в формулу (1), получаем, что размерность входного вектора состояния для всего рассматриваемого диспетчерского участка составляет  $D = 335$  дискретных состояний.

Для оценки вычислительной сложности рассмотрим две архитектуры: многослойный перцептрон (*MLP*) и рекуррентную сеть с долгой краткосрочной памятью (*LSTM*). Параметры моделей выбраны на основе анализа современных исследований в области проектирования нейросетевых архитектур.

Размер скрытого слоя  $H = 128$  принят в соответствии с эмпирическими рекомендациями [6], согласно которым для задач с объемом обучающей выборки порядка  $10^4$ – $10^5$  (что соответствует объемам данных, собираемых на диспетчерском участке за несколько месяцев эксплуатации) оптимальное число нейронов находится в диапазоне 100–150.

Число слоев  $L = 2$  выбрано исходя из теоремы об универсальной аппроксимации [7], согласно которой двух скрытых слоев достаточно для моделирования как непрерывных, так и разрывных функций, что соответствует практическим рекомендациям для задач классификации технических систем.

Размер выходного пространства  $C_{out} = 62$  соответствует количеству маршрутных команд, доступных диспетчеру на рассматриваемом диспетчерском участке. Маршрутные команды включают маршруты приема и отправления, а также маневровые маршруты в пределах станций. Выбор именно маршрутных команд в качестве выходного пространства нейросети обусловлен тем, что они составляют основу оперативной работы диспетчера и покрывают большинство штатных ситуаций управления движением.

Глубина временного окна  $T$  определяет объем исторических данных о состоянии объектов ЖАТ, доступных нейросети для анализа. Под тактом в данной работе понимается один полный цикл опроса системы диспетчерской централизации, по завершении которого формируется актуальный вектор состояния объектов. Для рассматриваемого участка длительность такта составляет от 20 до 30 с в зависимости от загрузки каналов связи. Выбор  $T = 15$  тактов обусловлен необходимостью захвата полной динамики типового маршрута приема (2–4 мин). Даже при максимальной оценке длительности такта (30 с) окно  $T = 15$  соответствует 7,5 мин реального времени, что гарантированно перекрывает длительность маршрута и обеспечивает захват всех значимых событий (занятие рельсовых цепей, изменение показаний светофоров), достаточных для достоверного распознавания штатных и аварийных ситуаций.

Для учета временного контекста в *MLP* применяется операция спрямления (*flatten*) последовательности из  $T$ -тактов в единый вектор размерностью  $T \times D$  [8]. Спрямление преобразует многомерные входные данные в одномерный вектор путем последовательного соединения всех элементов, что позволяет подавать временную последовательность на вход стандартному многослойному перцептрон, однако приводит к потере структуры временных зависимостей [4]. Для рассматриваемого участка размерность спрямленного вектора составляет 5025.

Для *MLP* число параметров определяется как сумма параметров каждого полносвязного слоя. Для слоя, преобразующего вход размерности  $n$  в выход размерности  $m$ , количество обучаемых параметров  $P$  составляет [8]:

$$P = (n \cdot m) + m, \quad (2)$$

где  $(n \cdot m)$  – число весовых коэффициентов;  $m$  – число смещений (*bias*).

Применяя формулу (2) последовательно к слоям сети с учетом спрямленного входного вектора размерности  $T \times D$ , скрытых слоев размера  $H$  и выходного слоя размера  $C_{out}$ , получаем выражение

$$P_{MLP} = (T \cdot D) \cdot H + H + H \cdot C_{out} + C_{out}. \quad (3)$$

В *LSTM* временная последовательность обрабатывается естественным образом, без спрямления. Число параметров для *LSTM* с  $L$ -слоями определяется по формуле [8, 9]

$$P_{LSTM} = 4 \cdot ((D + H) \cdot H + H) \cdot L + H \cdot C_{out} + C_{out}. \quad (4)$$

Результаты расчета количества обучаемых параметров представлены в табл. 3. Для всех моделей приняты единые параметры: размер скрытого слоя  $H = 128$ , число слоев  $L = 2$ , размер выходного пространства  $C_{out} = 62$  (количество маршрутных команд). Глубина анализируемого временного окна составляет  $T = 15$  тактов.

Таблица 3

## Расчет количества обучаемых параметров

Архитектура	Учет временного контекста	Входные данные	Входная размерность	Количество параметров
<i>MLP</i> (статичный)	Не учитывается (только текущий момент) $T = 1$	Один вектор состояния	335	<b>65 970</b>
<i>MLP</i> (с временным окном)	Спряmlение ( <i>flatten</i> ) последовательности $T = 15$	15 склеенных векторов	5 025	<b>667 838</b>
<i>LSTM</i>	Последовательная обработка $T = 15$	Временной ряд из 15 векторов	$335 \times 15$	<b>377 150</b>

**Выводы**

Как видно из полученных данных, статичный *MLP*, работающий только с текущим снимком состояния, требует минимального числа параметров (66 тыс.), однако такой подход не учитывает временной контекст и не способен различать ситуации с одинаковым текущим состоянием, но разной предысторией.

При попытке учесть временной контекст через спряmlение последовательности из  $T = 15$  тактов *MLP* увеличивает число параметров более чем в 10 раз (до 668 тыс.), что ведет к резкому росту вычислительной сложности, требований к памяти и риску переобучения.

*LSTM* при работе с той же глубиной окна требует 377 тыс. параметров – в 1,77 раза меньше, чем *MLP*, при этом сохраняя структуру временной последовательности и способность моделировать контекст событий благодаря внутренней архитектуре с четырьмя гейтами [8, 10].

В результате анализа установлено, что *LSTM* обеспечивает лучшее соотношение между вычислительной эффективностью и способностью к анализу динамики, следовательно, предпочтительно выбирать *LSTM* в качестве базовой архитектуры нейросетевого модуля построения интеллектуального ассистента поездного диспетчера.

**Список литературы**

- 1 **Алымов, И. О.** Проблемы безопасности и надежности в автоматизированных системах управления движением поездов / И. О. Алымов // Транспорт : наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 23–25 апреля 2025 г. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2025. – С. 28–32. – EDN CULUWE.
- 2 Особенности эмоционального состояния работников железнодорожного транспорта / Н. Н. Малутина, А. Л. Сединин, С. В. Лузина, Н. С. Сединина // Журнал научных статей Здоровье и образование в XXI веке. – 2017. – Т. 19, № 10. – С. 109–110. – EDN ZATOKV.
- 3 **Долгий, И. Д.** Актуальность внедрения автоматического блокирующего логического контроля действий оперативного персонала в автоматизированных системах управления движением поездов / И. Д. Долгий, И. О. Алымов, А. О. Горобец // Цифровые инфокоммуникационные технологии : сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 27 октября 2023 г. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 380–384. – EDN AJAKND.

**References**

- 1 **Alymov, I. O.** Problems of safety and reliability in automated train traffic control systems / I. O. Alymov // Transport : Science, Education, Production : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference, Rostov-on-Don, April 23–25, 2025. – Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2025. – P. 28–32. – EDN CULUWE.
- 2 Features of the emotional state of railway transport workers / N. N. Malyutina, A. L. Sedinin, S. V. Luzina, and N. S. Sedinin // Journal of scientific articles “Health and Education in the 21st Century”. – 2017. – Vol. 19, No. 10. – P. 109–110. – EDN ZATOKV.
- 3 **Dolgy, I. D.** The relevance of implementing automatic blocking logical control of operational personnel actions in automated train traffic management systems / I. D. Dolgy, I. O. Alymov, A. O. Gorobets // Digital infocommunication technologies : collection of scientific papers, Rostov-on-Don, October 27, 2023. – Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2023. – P. 380–384. – EDN AJAKND.

4 **Комличенко, В. Н.** Сравнительный анализ различных архитектур нейронных сетей для задач регрессии / В. Н. Комличенко, В. А. Федосенко, А. С. Купрейчик // Экономика и качество систем связи. – 2025. – № 1 (35). – С. 110–121. – EDN PAGCVM.

5 **Пустынний, Я. Н.** Решение проблемы исчезающего градиента с помощью нейронных сетей долгой краткосрочной памяти / Я. Н. Пустынний // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 2. – С. 130–132. – EDN MRQIHM.

6 **Lunt, A.** An empirically-sourced heuristic for predetermining the size of the hidden layer of a multi-layer perceptron for large datasets. Lecture Notes in Computer Science / A. Lunt, S. Xu // LNAI. – 2016. – Vol. 9992. – P. 542–547. – DOI 10.1007/978-3-319-50127-7\_47.

7 **Cybenko, G.** Approximation by superpositions of a sigmoidal function / G. Cybenko // Mathematics of Control, Signals, and Systems. – 1989. – Vol. 2, No. 4. – P. 303–314. – DOI 10.1007/bf02551274.

8 **Гудфеллоу, Я.** Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвиль. – Москва : ДМК Пресс, 2018. – 652 с. – ISBN 978-5-97060-618-6.

9 Data Science Stack Exchange. (2016). Number of parameters in an LSTM model. – URL: <https://data-science.stackexchange.com/questions/10615/number-of-parameters-in-an-lstm-model> (date of access: 20.02.2026).

10 Hochreiter, S. Long short-term memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // Neural Computation. – 1997. – Vol. 9 (8). – P. 1735–1780. – DOI 10.1162/neco.1097.9.8.1735.

4 **Komlichenko, V. N.** Comparative analysis of various neural network architectures for regression problems / V. N. Komlichenko, V. A. Fedosenko, A. S. Kupreichik // Economics and Quality of Communication Systems. – 2025. – No. 1 (35). – P. 110–121. – EDN PAGCVM.

5 **Pustiny, Ya. N.** Solving the problem of a vanishing gradient using neural networks of long short-term memory / Ya. N. Pustiny // Innovations and Investments. – 2020. – No. 2. – P. 130–132. – EDN MRQIHM.

6 **Lunt, A.** An empirically-sourced heuristic for predetermining the size of the hidden layer of a multi-layer perceptron for large datasets. Lecture Notes in Computer Science / A. Lunt, S. Xu // LNAI. – 2016. – Vol. 9992. – P. 542–547. – DOI 10.1007/978-3-319-50127-7\_47.

7 **Cybenko, G.** Approximation by superpositions of a sigmoidal function / G. Cybenko // Mathematics of Control, Signals, and Systems. – 1989. – Vol. 2, No. 4. – P. 303–314. – DOI 10.1007/bf02551274.

8 **Goodfellow, Ya.** Deep learning / Ya. Goodfellow, I. Bendjio, A. Courville. Moscow : DMK Press, 2018. 652 p. – ISBN 978-5-97060-618-6.

9 Data Science Stack Exchange. (2016). Number of parameters in an LSTM model. – URL: <https://datascience.stackexchange.com/questions/10615/number-of-parameters-in-an-lstm-model> (date of access: 20.02.2026).

10 Hochreiter, S. Long short-term memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // Neural Computation. – 1997. – Vol. 9 (8). – P. 1735–1780. – DOI 10.1162/neco.1097.9.8.1735

*I. O. Alymov*

## ANALYSIS OF PARAMETERS OF BASIC NEURAL NETWORK ARCHITECTURES IN TRANSPORT CONTROL SYSTEMS

**Abstract.** The article considers an approach to improving the efficiency of automated train control systems by integrating a neural network assistant module into the contour of the automatic blocking logical control (ABLC) subsystem. An analysis of the applicability of various neural network architectures for solving problems of intelligent support for train dispatchers is carried out, including multilayer perceptron (MLP) and long short-term memory networks (LSTM). Based on a simulation model of a dispatching section comprising three stations, quantitative assessment of the dimension of the input vector of the state a quantitative assessment of the input state vector dimension and computational complexity of the considered architectures is performed. Formulas for calculating the number of trainable parameters are presented, and a comparison of MLP and LSTM with identical model parameters is made. The results of the comparative analysis demonstrate the advantage of LSTM in terms of computational efficiency while preserving the structure of temporal dependencies. Based on the obtained results, the choice of LSTM as the basic architecture for building an intelligent assistant operating in a single contour with the ABLC subsystem is substantiated.

**Keywords:** automated train control systems, the human factor, dispatch centralization, intelligent decision support systems, active blocking logical control, neural networks, *LSTM*, multilayer perceptron (*MLP*).

**For citation:** Alymov, I. O. Analysis of parameters of basic neural network architectures in transport control systems / I. O. Alymov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026 – No. 1. – P. 20–27. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_20.

#### **Сведения об авторах**

##### **АЛЫМОВ ИЛЬЯ ОЛЕГОВИЧ**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте»,  
аспирант,  
e-mail: ilya-alymov@mail.ru

#### **Information about the authors**

##### **Alymov Ilya Olegovich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair “Railway Automation and  
Telemechanics”,  
Postgraduate Student,  
e-mail: ilya-alymov@mail.ru

## ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.331 : 621.311 + 06

DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_28

*В. А. Осипов***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ЛИНИЯМИ СВЯЗИ**

**Аннотация.** Предложен подход для определения тока во всех элементах многопроводной тяговой сети, в состав которой входит волоконно-оптический кабель с металлической оболочкой. Рассмотрены методика расчета тока в экранирующем проводнике и способ определения сопротивления тяговой сети двухпутного участка железной дороги с учетом распределенного сопротивления проводника обратного тока. Полученные соотношения могут быть использованы при разработке методики расчета термической стойкости оптического кабеля к длительно протекающим тяговым токам, а также для расчета сопротивления тяговой сети при проектировании новых и модернизации существующих участков железной дороги переменного тока.

**Ключевые слова:** тяговая сеть, волоконно-оптический кабель, система с комбинированным экранирующим проводником, термическая стойкость.

**Для цитирования:** Осипов, В. А. Определение электрических параметров тяговых сетей, интегрированных с волоконно-оптическими линиями связи / В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 28–35. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_28.

**Введение**

Тяговые сети однофазного переменного тока промышленной частоты обладают весьма существенным реактивным сопротивлением, имеющим индуктивный характер. Это объясняется тем, что в силу конструктивных особенностей такая линия электропередачи состоит из проводников прямого и обратного тока, разнесенных в пространстве на значительное расстояние. Так как прямой проводник представлен контактной сетью, а обратный – рельсовым путем, непосредственно сблизить эти проводники не представляется возможным. При этом именно величиной индуктивной компоненты сопротивления тяговой сети определяется уровень напряжения на пантографе электровоза, что определяет пропускную способность участка при максимальных нагрузках. Для решения данной проблемы был разработан ряд технических решений, позволяющих уменьшить величину реактивной составляющей сопротивления тяговой сети, а именно предложены и внедрены тяговые сети с коаксиальным усиливающим фидером, тяговые сети с экранирующим и усиливающим проводом (ЭУП), тяговые сети с экранирующим проводом (ЭП). Все перечисленные решения позволяли с разной степенью эффективности решить проблемы снижения реактивного сопротивления тяговой сети, однако общим недостатком этих решений была необходимость прокладки дополнительных питающих и заземленных проводов на опорах контактной сети вдоль всей трассы железной дороги. Сложность подбора коаксиального кабеля в системе с коаксиальным усиливающим фидером и необходимость значительного увеличения расхода цветного металла при сооружении участка железной дороги в системе с ЭУП и в системе с ЭП в некоторой мере ограничили использование перечисленных типов энергоэффективных тяговых сетей.

**Основная часть**

Прокладка волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) по опорам контактной сети, при условии, что эти линии сооружаются с использованием кабелей с металлической оболочкой, открывает возможность использования проводящей оболочки ВОЛС в качестве экранирующего проводника как в системе с ЭУП, так и в системе с ЭП. Так как для реализации тяговой сети с ЭУП необходима прокладка двух дополнительных проводников, при наличии на участке дороги волоконно-оптической линии связи, выполненной кабелем типа ОКГТ, следует рассмотреть возможность использования проводящей оболочки ВОЛС. При этом необходимо оценить возможность включения оптоволоконного кабеля в систему тягового электроснабжения в качестве экранирующего провода – дополнительного проводника обратного тока. Применение волоконно-оптического кабеля как элемента системы тягового электроснабжения позволяет говорить о его двойном назначении и создать тяговую сеть, обладающую новым функционалом. Экранирующий провод в данном случае будет совмещать в себе функции проводника обратного тока и волоконно-оптической линии связи, – будем называть его комбинированным

экранирующим проводом (КЭП). Для практического применения тяговой сети с КЭП необходимо решить следующие задачи:

– определение сопротивления тяговой сети, включающей в себя обратный проводник, в качестве которого выступает проводящая оболочка ВОЛС, так как стандартные типы проводов, используемых на электрифицированных железных дорогах, имеют электрические параметры, отличные от параметров кабелей ВОЛС;

– определение граничных условий работы оптоволоконного кабеля по критерию нагрева его рабочими токами и токами короткого замыкания, так как в отличие от применяемых типов дополнительных проводов (А-185, А-150 и т. д.) волоконно-оптический кабель чувствителен к длительному протеканию токов, вызывающих его нагрев выше критически допустимой температуры;

– разработка рекомендаций по подвеске оптоволоконного кабеля на опорах контактной сети с учетом особенностей эксплуатации волоконно-оптической линии связи и соблюдения требований по обеспечению электробезопасности при ее обслуживании.

Для определения величины тока в металлической оболочке волоконно-оптического кабеля, выполняющего функцию обратного провода, предлагается изложенный ниже подход. Рассмотрим алгоритм расчета токораспределения в тяговой сети двухпутного участка тяговой сети с комбинированным экранирующим проводом. Положим, что на участке принято раздельное питание путей, и волоконно-оптический кабель завешен на опорах обоих путей с полевой стороны. Будем считать, что контактные подвески и рельсовые цепи обоих путей участка идентичны, при этом все габариты проводников первого и второго пути, включая экранирующие проводники, одинаковы.

Модель участка железной дороги, для которой выполняется анализ, показана на рис. 1. Питающие и заземленные проводники первого пути имеют индекс «1», второго пути – «2». Используя геометрию участка, приведенного на рис. 1, можно составить соотношения для определения взаимных расстояний между расчетными элементами двух путей (все переменные, упомянутые в выражениях приведены согласно рис. 1):

– эквивалентным контактным проводом одного и экранирующим проводом другого пути  $a_{кЭО}$ :

$$a_{кЭО} = \sqrt{(d_k + d_{к12} + d_э)^2 + (h_э - h_k - h_H)^2}; \quad (1)$$

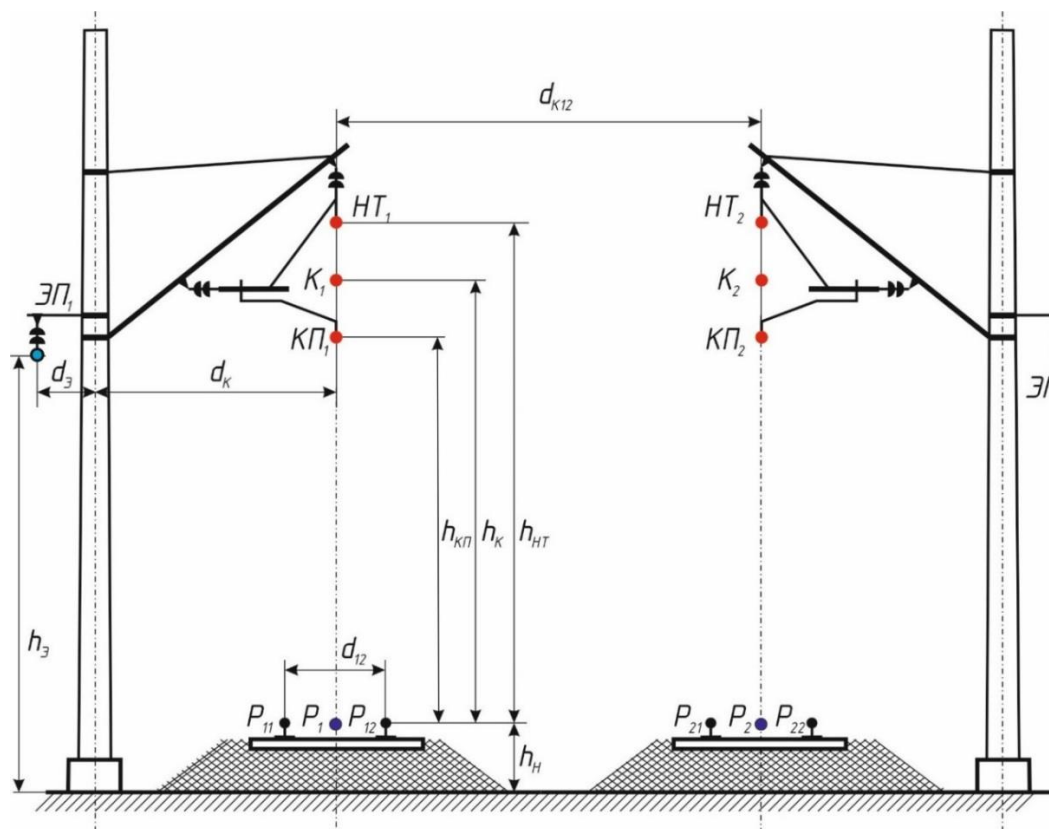


Рис. 1. Принятые обозначения для расчета сопротивления тяговой сети двухпутного участка

– эквивалентным рельсом одного и экранирующим проводом другого пути  $a_{PЭO}$ :

$$a_{PЭO} = \sqrt{(d_K + d_{K12} + d_Э)^2 + (h_Э - h_H)^2}; \quad (2)$$

– эквивалентным контактным проводом одного и эквивалентным рельсом другого пути  $a_{KPO}$ :

$$a_{KPO} = \sqrt{d_{K12}^2 + h_K^2}; \quad (3)$$

– экранирующими проводниками первого и второго пути  $a_{Э12}$ :

$$a_{Э12} = 2d_Э + 2d_K + d_{K12}.$$

В рассуждениях будем полагать что весь ток в рельсах и экранирующих проводниках носит чисто индуцированный характер. Выполним преобразование сопротивления рельсов и экранирующих проводников обоих путей к эквивалентному сопротивлению проводника обратного тока. Для этого используем на первом этапе подход по преобразованию рельсов двух путей к одному эквивалентному рельсу, обозначив в дальнейших рассуждениях его сопротивление как  $Z_P$ . Сопротивление взаимной индукции между экранирующими проводниками обозначим как  $Z_{Э1Э2}$ . Сопротивление взаимной индукции зависит непосредственно от расстояний между проводниками, для дальнейших рассуждений введем следующие обозначения:

$$Z_{PЭ} = Z_{PЭ_2} = Z_{PЭ_1}.$$

На рис. 2 представлен элемент тяговой сети, где четыре нитки рельса заменены одним эквивалентным рельсом, а также с двух сторон участка завешена волоконно-оптическая линия связи.

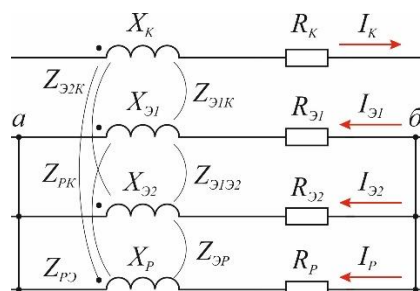


Рис. 2. К расчету параметров эквивалентного проводника обратного тока

Для малого элемента тяговой сети двухпутного участка, показанного на рис. 2, можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U}_{ab} = \dot{I}_{Э1}Z_{Э1} + \dot{I}_{Э2}Z_{Э1Э2} + \dot{I}_P Z_{PЭ} - \dot{I}_K Z_{Э1К}, \\ \dot{U}_{ab} = \dot{I}_{Э2}Z_{Э2} + \dot{I}_{Э1}Z_{Э1Э2} + \dot{I}_P Z_{PЭ} - \dot{I}_K Z_{Э2К}, \\ \dot{U}_{ab} = \dot{I}_{Э1}Z_{PЭ} + \dot{I}_{Э2}Z_{PЭ} + \dot{I}_P Z_P - \dot{I}_K Z_{PK}. \end{cases} \quad (4)$$

Учитывая, что цепь обратного тока в данной схеме представлена эквивалентным рельсом с параллельно подключенными к нему двумя экранирующими проводниками, функцию которых выполняет проводящая оболочка ВОЛС, обозначим ток, протекающий в эквивалентном проводнике обратного тока, как

$$\dot{I} = \dot{I}_{Э1} + \dot{I}_{Э2} + \dot{I}_P. \quad (5)$$

С учетом (5) перепишем (4):

$$\begin{cases} \dot{U}_{ab} + \dot{I}_K Z_{Э1К} = \dot{I}_{Э1} (Z_{Э1} - Z_{ЭP}) + \dot{I}_{Э2} (Z_{Э1Э2} - Z_{ЭP}) + \dot{I} Z_{ЭP}, \\ \dot{U}_{ab} + \dot{I}_K Z_{Э2К} = \dot{I}_{Э2} (Z_{Э2} - Z_{ЭP}) + \dot{I}_{Э1} (Z_{Э1Э2} - Z_{ЭP}) + \dot{I} Z_{ЭP}, \\ \dot{U}_{ab} + \dot{I}_K Z_{PK} = \dot{I}_{Э1} (Z_{PЭ} - Z_P) + \dot{I}_{Э2} (Z_{PЭ} - Z_P) + \dot{I} Z_P. \end{cases} \quad (6)$$

Вычитая из первого уравнения (6) второе, получим:

$$\dot{i}_K(Z_{\text{Э1К}} - Z_{\text{Э2К}}) = \dot{i}_{\text{Э1}}(Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{Э1Э2}}) + \dot{i}_{\text{Э2}}(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{Э2}}).$$

Выразим ток в экранирующих проводах:

$$\dot{i}_{\text{Э1}} = \frac{\dot{i}_K(Z_{\text{Э1К}} - Z_{\text{Э2К}}) + \dot{i}_{\text{Э2}}(Z_{\text{Э2}} - Z_{\text{Э1Э2}})}{(Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{Э1Э2}})}; \quad (7)$$

$$\dot{i}_{\text{Э2}} = \frac{\dot{i}_K(Z_{\text{Э2К}} - Z_{\text{Э1К}}) + \dot{i}_{\text{Э1}}(Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{Э1Э2}})}{(Z_{\text{Э2}} - Z_{\text{Э1Э2}})}. \quad (8)$$

Вычитая из второго уравнения (6) третье, получим:

$$\dot{i}_K(Z_{\text{Э2К}} - Z_{\text{ПК}}) + \dot{i}(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}}) = \dot{i}_{\text{Э1}}(Z_{\text{Э1Э2}} + Z_{\text{П}} - 2Z_{\text{ЭП}}) + \dot{i}_{\text{Э2}}(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{П}} - 2Z_{\text{ЭП}}).$$

Подставляя в полученное выражение соотношение (6), получим:

$$\dot{i}_{\text{Э1}} = A_1 \dot{i}_K + A_2 \dot{i}; \quad (9)$$

$$\dot{i}_{\text{Э2}} = A_3 \dot{i}_K + A_4 \dot{i}. \quad (10)$$

Ток в рельсах определим из соотношения:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{\text{П}} &= \dot{i}_{\text{Э1}} \frac{(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} + \dot{i}_{\text{Э2}} \frac{(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} - \dot{i}_K \frac{(Z_{\text{Э2К}} - Z_{\text{ПК}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})}, \\ \dot{i}_{\text{П}} &= (A_1 \dot{i}_K + A_2 \dot{i}) \frac{(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} + (A_3 \dot{i}_K + A_4 \dot{i}) \frac{(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} - \dot{i}_K \frac{(Z_{\text{Э2К}} - Z_{\text{ПК}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})}. \end{aligned} \quad (11)$$

В этих выражениях безразмерные коэффициенты «А»:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{Z_{\text{Э1К}}(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{П}} - 2Z_{\text{ЭП}}) - Z_{\text{Э2К}}(Z_{\text{Э1Э2}} + Z_{\text{П}} - 2Z_{\text{ЭП}}) + Z_{\text{ПК}}(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{Э2}})}{2Z_{\text{ЭП}}(2Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{Э2}}) + Z_{\text{Э1}}Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{П}}(Z_{\text{Э1}} + Z_{\text{Э2}}) - Z_{\text{Э1Э2}}(Z_{\text{Э1Э2}} + 2Z_{\text{П}})}; \\ A_2 &= \frac{Z_{\text{П}}Z_{\text{Э2}} - Z_{\text{П}}Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}}Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{ЭП}}Z_{\text{Э1Э2}}}{2Z_{\text{ЭП}}(2Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{Э2}}) + Z_{\text{Э1}}Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{П}}(Z_{\text{Э1}} + Z_{\text{Э2}}) - Z_{\text{Э1Э2}}(Z_{\text{Э1Э2}} + 2Z_{\text{П}})}; \\ A_3 &= \frac{Z_{\text{Э2К}}(Z_{\text{Э1}} + Z_{\text{П}} - 2Z_{\text{ЭП}}) - Z_{\text{Э1К}}(Z_{\text{Э1Э2}} + Z_{\text{П}} - 2Z_{\text{ЭП}}) + Z_{\text{ПК}}(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{Э1}})}{2Z_{\text{ЭП}}(2Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{Э2}}) + Z_{\text{Э1}}Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{П}}(Z_{\text{Э1}} + Z_{\text{Э2}}) - Z_{\text{Э1Э2}}(Z_{\text{Э1Э2}} + 2Z_{\text{П}})}; \\ A_4 &= \frac{Z_{\text{П}}Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{П}}Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}}Z_{\text{Э1}} + Z_{\text{ЭП}}Z_{\text{Э1Э2}}}{2Z_{\text{ЭП}}(2Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{Э1}} - Z_{\text{Э2}}) + Z_{\text{Э1}}Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{П}}(Z_{\text{Э1}} + Z_{\text{Э2}}) - Z_{\text{Э1Э2}}(Z_{\text{Э1Э2}} + 2Z_{\text{П}})}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для определения составляющих эквивалентного сопротивления цепи обратного тока используем первое выражение системы уравнений (4). После подстановки в него соотношений (9)–(11) и ряда преобразований выражение для расчета падения напряжения на эквивалентном проводнике будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{аб}} &= \dot{i} \left( Z_{\text{Э1}}A_2 + Z_{\text{Э1Э2}}A_4 + A_2 \frac{(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} + A_4 \frac{(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} \right) + \\ &+ \dot{i}_K \left( Z_{\text{Э1}}A_1 + Z_{\text{Э1Э2}}A_3 + A_1 \frac{(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} + A_3 \frac{(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} - \frac{(Z_{\text{Э2К}} - Z_{\text{ПК}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} - Z_{\text{Э1К}} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Первое слагаемое в полученном выражении (13) – это падение напряжения на собственном сопротивлении проводника обратного тока, второе слагаемое – результат взаимоиндуктивного влияния токов в контактной подвеске:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{до}} &= \dot{i} \cdot Z_{\text{экв}} + \dot{i}_{\text{к}} \cdot Z_{\text{М}}; \\ Z_{\text{экв}} &= Z_{\text{Э1}} A_2 + Z_{\text{Э1Э2}} A_4 + A_2 \frac{(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} + A_4 \frac{(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}}; \\ Z_{\text{М}} &= Z_{\text{Э1}} A_1 + Z_{\text{Э1Э2}} A_3 + A_1 \frac{(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} + A_3 \frac{(Z_{\text{Э2}} + Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} - \frac{(Z_{\text{Э2К}} - Z_{\text{ПК}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} Z_{\text{ПЭ}} - Z_{\text{Э1К}}. \end{aligned}$$

Таким образом, рассчитаны параметры проводника обратного тока, эквивалентного двум эквивалентным экранирующим проводникам и четырем ниткам рельсов двухпутного участка железной дороги. Используя эти данные, применим выражение:

$$\dot{i} = \dot{i}_{\text{к}} \frac{Z_{\text{М}}}{Z_{\text{экв}}} + \frac{1}{2} \dot{i}_{\text{к}} \left( 1 - \frac{Z_{\text{М}}}{Z_{\text{экв}}} \right) \left( e^{-\gamma x} + e^{-\gamma(X-x)} \right). \quad (14)$$

Задавшись расстоянием от тяговой подстанции до местоположения нагрузки –  $X$ , можно построить зависимость изменения тока в эквивалентном проводнике как функцию расстояния от тяговой подстанции до нагрузки, с учетом влияния земли. Далее, используя (9) или (10), определить долю тока, протекающего в волоконно-оптическом кабеле, с учетом изменения величины тока по расстоянию. Эта характеристика необходима для определения термической стойкости оптических волокон ВОЛС к температурам нагрева тяговым током. Определение результирующего профиля тока в экранирующих проводниках несложно произвести, используя принцип и метод наложения, так как все влияющие на данный процесс функции – линейны, а следовательно, метод наложения в данном случае применим.

Вернемся к вопросу определения величины сопротивления тяговой сети с ВОЛС. Так как исследуется двухпутный участок, очевидно, в цепи обратного тока будет протекать эквивалентный ток, определяемый нагрузкой обоих путей. Используя принцип наложения, ток в экранирующих проводниках с учетом (9)–(11) будем определять как:

$$\dot{i}_{\text{Э1}} = A_1 (\dot{i}'_{\text{к}} + \dot{i}''_{\text{к}}) + A_2 (\dot{i}' + \dot{i}''); \quad (15)$$

$$\dot{i}_{\text{Э2}} = A_3 (\dot{i}'_{\text{к}} + \dot{i}''_{\text{к}}) + A_4 (\dot{i}' + \dot{i}''); \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_{\text{П}} &= \left( A_1 (\dot{i}'_{\text{к}} + \dot{i}''_{\text{к}}) + A_2 (\dot{i}' + \dot{i}'') \right) \frac{(Z_{\text{Э1Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} - (\dot{i}'_{\text{к}} + \dot{i}''_{\text{к}}) \frac{(Z_{\text{Э2К}} - Z_{\text{ПК}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})} + \\ &+ \left( A_3 (\dot{i}'_{\text{к}} + \dot{i}''_{\text{к}}) \dot{i}''_{\text{к}} + A_4 (\dot{i}' + \dot{i}'') \right) \frac{(Z_{\text{Э2}} - Z_{\text{ЭП}})}{(Z_{\text{П}} - Z_{\text{ЭП}})}. \end{aligned} \quad (17)$$

В этих выражениях токи с одним штрихом относятся к первому пути, а с двумя – ко второму. Падение напряжения в контуре, образованном контактным проводом и рельсом, определяется выражением:

$$\Delta U = \dot{i}'_{\text{к}} Z_{\text{К}} + \dot{i}''_{\text{к}} Z_{\text{К12}} - \dot{i}_{\text{П}} Z_{\text{КП}} - \dot{i}_{\text{Э1}} Z_{\text{КЭ}} - \dot{i}_{\text{Э2}} Z_{\text{КЭ}} + \dot{i}_{\text{П}} Z_{\text{П}} + \dot{i}_{\text{Э1}} Z_{\text{ПЭ}} + \dot{i}_{\text{Э2}} Z_{\text{ПЭ}} - \dot{i}_{\text{К}} Z_{\text{КР}}.$$

После преобразования с учетом

$$\dot{i} = \dot{i}' + \dot{i}''$$

запишем соотношение:

$$\Delta U = \dot{i}'_{\text{к}} (Z_{\text{К}} - Z_{\text{КР}}) + \dot{i}''_{\text{к}} Z_{\text{К12}} + \dot{i} (Z_{\text{П}} - Z_{\text{КР}}) - (\dot{i}_{\text{Э1}} + \dot{i}_{\text{Э2}}) (Z_{\text{КЭ}} - Z_{\text{ПЭ}} + Z_{\text{П}} - Z_{\text{КР}}). \quad (18)$$

Для определения эквивалентного сопротивления тяговой сети разделим обе части выражения (18) на ток, протекающий в тяговой сети, этот ток равен току контактной сети расчетного пути:

$$Z = Z_{\text{К}} - Z_{\text{КР}} + \frac{\dot{i}''_{\text{к}}}{\dot{i}'_{\text{к}}} Z_{\text{К12}} + \frac{\dot{i}}{\dot{i}'_{\text{к}}} (Z_{\text{П}} - Z_{\text{КР}}) - \left( \frac{\dot{i}_{\text{Э1}} + \dot{i}_{\text{Э2}}}{\dot{i}'_{\text{к}}} \right) (Z_{\text{КЭ}} - Z_{\text{ПЭ}} + Z_{\text{П}} - Z_{\text{КР}}). \quad (19)$$

Отношение токов контактных подвесок обоих путей заменим расчетным коэффициентом:

$$\beta = \frac{i''_K}{i'_K}.$$

Равенство этого коэффициента единице означает равенство токов обоих путей по величине и направлению. Если токи путей равны, но направлены встречно, то этот коэффициент равен минус единице, и если ток второго пути отсутствует, то коэффициент равен нулю. Учтем также, что:

$$\frac{i_{\Sigma 1}}{i'_K} = A_1(1+\beta) + A_2(1+\beta) = (A_1 + A_2)(1+\beta),$$

$$\frac{i_{\Sigma 2}}{i'_K} = A_3(1+\beta) + A_4(1+\beta) = (A_3 + A_4)(1+\beta).$$

Окончательно запишем:

$$Z = Z_K - Z_{KP} + \beta Z_{K12} - \left( (1+\beta) \sum_{K=1}^4 A_K \right) (Z_{KЭ} - Z_{PЭ} + Z_P - Z_{KP}) + \left( \frac{Z_M}{Z_{ЭКВ}} + \left( \frac{1}{2} - \frac{Z_M}{2Z_{ЭКВ}} \right) (e^{-\gamma x} + e^{-\gamma(X-x)}) \right) (Z_P - Z_{KP}).$$

Полученное выражение позволяет выполнить расчет эквивалентного сопротивления одного пути участка тяговой сети с экранирующим проводом. Для расчета сопротивления смежного пути, при условии, что параметры контактной сети или ВОЛС иные, следует поменять местами переменные с одним и двумя штрихами.

### Выводы

Предлагаемый в работе подход к определению величины токов волоконно-оптического кабеля позволяет использовать принцип наложения при моделировании результирующей токовой нагрузки на ВОЛС. Реализация данного подхода при использовании вычислительной техники позволит упростить задачу имитационного моделирования процесса работы элементов системы электроснабжения участка железной дороги переменного тока, проводимую в том числе с целью проверки термической стойкости волоконно-оптического кабеля к протеканию тяговых токов, с учетом нестационарного процесса нагрева элементов тяговой сети и непосредственно ВОЛС.

### Список литературы

- 1 Электротермическая деградация оптического кабеля на участках железных дорог переменного тока / Ю. И. Филиппов, Э. Е. Асс, Л. Е. Попов [и др.] // Lightwave Russian Edition. – 2006. – № 3. – С. 20–24. – ISSN 0741-5834.
- 2 Оплавление диэлектрического оптического кабеля, подвешенного на железнодорожных опорах под действием электротермической деградации / И. Н. Чернов, В. И. Муратов, С. М. Куценко, С. А. Зеленев // Lightwave Russian Edition. – 2007. – № 2. – С. 34–35. – ISSN 0741-5834.
- 3 Проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи и перспективные направления их решения / В. А. Осипов, Г. Е. Соловьев, Е. В. Гороховский, А. А. Капкаев // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 1. – URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539) (дата обращения 27.02.2026).
- 4 **Гороховский, Е. В.** Условия электропроводности самонесущего волоконно-оптического кабеля. Экспериментальные данные / Е. В. Гороховский // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. – URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1968](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1968) (дата обращения 27.02.2026).

### References

- 1 Electrothermal degradation of optical cable on AC railway section / A. S. Bochev, V. A. Osipov, G. E. Solovyev [et al.] // Lightwave. Russian Edition. – 2006. – No. 3. – P. 20–24. – ISSN 0741-5834.
- 2 Melting of dielectric optical cable suspended on railway supports under the influence of electrothermal degradation / I. N. Chernov, V. I. Muratov, S. M. Kutsenko, S. A. Zelenev // Lightwave Russian Edition. – 2007. – No. 2. – P. 34–35. – ISSN 0741-5834.
- 3 Problems of electrothermal degradation of fiber-optic communication lines and promising directions for their solution. – Text: electronic / V. A. Osipov, G. E. Solovyov, E. V. Gorokhovskiy, A. A. Kapkaev // Engineering Journal of Don. – 2013. – No. 1. – URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539) (date of access: 27.02.2026).
- 4 **Gorokhovskiy, E. V.** Conditions of electrical conductivity of self-supporting fiber-optic cable. Experimental data. – Text: electronic / E. V. Gorokhovskiy // Engineering Journal of Don. – 2013. – No. 4. – URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1968](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1968) (date of access: 27.02.2026).

5 Каталог кабельной продукции ООО ТПК «БИЛМАРТ», КАБЕЛЬ-ИРКУТСК. – URL: [https://kabelir-kutsk.ru/shop/goods/kabel\\_okms\\_022\\_24\\_G652D\\_7kn-86525](https://kabelir-kutsk.ru/shop/goods/kabel_okms_022_24_G652D_7kn-86525) (дата обращения 27.02.2026).

6 **Осипова, А. И.** Расчет токов короткого замыкания сети постоянного тока при использовании двухуровневой системы группового заземления опор / А. И. Осипова, Ю. И. Жарков // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 6. – URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n6y2023/8489](http://ivdon.ru/magazine/archive/n6y2023/8489) (дата обращения 27.02.2026).

7 Техника высоких напряжений / И. М. Богатенков, Ю. Н. Бочаров, Н. И. Гумерова, Г. М. Иманов ; под общей редакцией профессора Г. С. Кучинского. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с. – ISBN 5-283-04757-1.

8 **Микаэльян, Е. Ю.** Моделирование электромагнитных полей участка железной дороги переменного тока / Е. Ю. Микаэльян, В. Н. Черных // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. – URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155](http://ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155) (дата обращения 27.02.2026).

9 **Лысенко, В. Г.** Определение границ участка тяговой сети с устойчивым коротким замыканием / В. Г. Лысенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1. – С. 145–152. – ISSN 0201-727X.

10 **Безуглый, А. В.** Актуальные проблемы повышения энергетической эффективности в современных условиях / А. В. Безуглый, В. Н. Черных // Сборник научных трудов «Транспорт : наука, образование, производство». Том 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2023. – С. 16–19.

11 **Трубицин, М. А.** Продление срока службы электрооборудования / М. А. Трубицин // Сборник научных трудов «Транспорт : наука, образование, производство». Том 3. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2022. – С. 51–54.

5 Catalog of cable products of LLC TPK “BILMART”, KABEL-IRKUTSK. – URL: [https://kabelir-kutsk.ru/shop/goods/kabel\\_okms\\_022\\_24\\_G652D\\_7kn-86525](https://kabelir-kutsk.ru/shop/goods/kabel_okms_022_24_G652D_7kn-86525) (date of access: 27.02.2026).

6 **Osipova, A. I.** Calculation of short-circuit currents of the DC network when using a two-level system of group grounding system of supports. – Text : electronic / A. I. Osipova, Yu. I. Zharkov // Engineering Journal of Don. – 2023. – No. 6. – URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n6y2023/8489](http://ivdon.ru/magazine/archive/n6y2023/8489) (date of access: 27.02.2026).

7 High voltage engineering / I. M. Bogatenkov, Yu. N. Bocharov, N. I. Gumerova, G. M. Imanov ; edited by professor G. S. Kuchinsky. – Saint Petersburg : Energoatomizdat. Saint Petersburg Branch, 2003. – 608 p. – ISBN 5-283-04757-1.

8 **Mikaelyan, E. Yu.** Modeling of electromagnetic fields of an AC Railway Section. – Text : electronic / E. Yu. Mikaelyan, V. N. Chernykh // Engineering Journal of Don. – 2019. – No. 2. – URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155](http://ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155) (date of access: 27.02.2026).

9 **Lysenko, V. G.** Defining the boundaries of a traction network section with a stable short circuit / V. G. Lysenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2020. – No. 1. – P. 145–152. – ISSN 0201-727X.

10 **Bezugly, A. V.** Actual problems of increasing energy efficiency in modern conditions / A. V. Bezugly, V. N. Chernykh // Transport : science, education, production : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference. Vol. 2. – Rostov-on-Don : RSTU, 2023. – P. 16–19. – ISBN 978-5-907295-89-6.

11 **Trubitsin, M. A.** Prolongation of the service life of electrical equipment / M. A. Trubitsin // Transport : science, education, production : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference. Vol. 3. – Rostov-on-Don : RSTU, 2022. – P. 51–54. – ISBN 978-5-907295-68-1.

*V. A. Osipov*

## DETERMINATION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF TRACTION NETWORKS INTEGRATED WITH FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES

**Abstract.** An approach is proposed for determining the current in all elements of a multi-wire traction network, which includes a fiber-optic cable with a metal sheath. A method for calculating the current in the shielding conductor is examined as well as a method for determining the traction network resistance of a double-track railway section, taking into account the distributed resistance of the return conductor. The resulting relationships can be used in

developing a method for calculating the thermal withstand of optical cables to long-term traction currents, as well as for calculating traction network resistance when designing new and upgrading existing AC railway sections.

**Keywords:** traction network, fiber-optic cable, system with a combined shielding conductor, thermal withstand.

**For citation:** Osipov, V. A. Determination of electrical parameters of traction networks integrated with fiber-optic communication lines / V. A. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 28–35. – DOI 10.46973/0201–727X\_2026\_1\_28.

#### Сведения об авторах

**Осипов Владимир Александрович**

Ростовский государственный  
университет путей сообщения  
(РГУПС),  
кафедра «Теоретические основы  
электротехники»,  
кандидат технических наук, доцент,  
декан, заведующий кафедрой,  
e-mail: dw\_@rambler.ru

#### Information about the authors

**Osipov Vladimir Alexandrovich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair “Theoretical Foundations of Electrical  
Engineering”,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor, Dean, Head of the Chair,  
e-mail: dw\_@rambler.ru

## УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.2 : 004.8

DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_36

*А. Т. Осьмилин, Т. А. Малахова, А. С. Рящиков, И. И. Осьмилина***ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

**Аннотация.** Представлен научный обзор отечественных и зарубежных исследований, посвящённых повышению скорости и устойчивости железнодорожных перевозок за счёт цифровизации и технологий искусственного интеллекта (ИИ). Показано, что эффект «ускорения» формируется комплексом решений: цифровыми двойниками инфраструктуры и перевозочного процесса, интеллектуальным планированием и диспетчеризацией, управлением пропускной способностью, предиктивным обслуживанием, платформенными механизмами взаимодействия участников, а также технологической автоматизацией операций в узлах (в том числе на базе цифровой автосцепки). Отдельно рассмотрена российская практика согласования перевозок на основе динамической модели загрузки инфраструктуры (ДМЗИ) ОАО «РЖД» как инструмента управления доступом к инфраструктурной мощности.

**Ключевые слова:** железнодорожная логистика, искусственный интеллект, цифровой двойник, диспетчеризация, пропускная способность, ДМЗИ, предиктивное обслуживание, цифровые платформы.

**Для цитирования:** Обзор исследований применения искусственного интеллекта и цифровых двойников для ускорения транспортных потоков на железнодорожном транспорте / А. Т. Осьмилин, Т. А. Малахова, А. С. Рящиков, И. И. Осьмилина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 36–42. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_36.

**Введение**

В железнодорожной логистике «ускорение транспортных потоков» означает не только рост участковой скорости, но и системное сокращение времени пребывания груза, вагона или поезда в цепочке перевозки: на этапе приёма и согласования заявки, при оперативном управлении графиком, в узлах (станции, сортировки, терминалы), а также в части прозрачности статусов, документов и расчётов. Как показывают обзоры применения цифровых двойников и ИИ в железнодорожных системах, ключевой результат достигается не отдельной «умной» моделью, а сквозной архитектурой данных и решений, связывающей планирование, эксплуатацию и обслуживание инфраструктуры [1, 2].

**Цель и методика обзора**

Цель статьи – обобщить современную исследовательскую повестку по использованию ИИ и цифровых двойников для ускорения и повышения устойчивости перевозочного процесса на железных дорогах, а также выделить направления, наиболее значимые для российской практики (включая ДМЗИ). Обзор выполнен в тематически-систематическом формате: источники сгруппированы по управленческим механизмам, которые напрямую влияют на скорость потока и величину задержек: оперативная диспетчеризация, операции на станциях и в узлах, обслуживание инфраструктуры, платформенные процессы согласований. Приоритет отдавался обзорным статьям и работам, описывающим архитектуру цифровых двойников и ИИ-поддержки решений [1–6].

**Направления исследований и логика систематизации**

Для практического использования результатов обзора целесообразно выделить семь блоков исследований (табл.), соответствующих ключевым «точкам возникновения задержек» в цепочке перевозки: моделирование и прогноз, планирование и диспетчеризация, оценка и распределение инфраструктурной мощности, устойчивость инфраструктуры, координация участников, скорость операций на станциях и в узлах и стандартизация цифровой среды [7–13].

## Логика систематизации исследований и «что ускоряют»

Тематический блок	Содержание и механизм влияния на ускорение потока
А. Цифровые двойники железнодорожных систем	Киберфизические модели, работающие на потоках данных, для сценарного анализа и поддержки решений; ускоряют за счёт сокращения времени выявления и локализации отклонений, повышения точности прогнозов и согласованности планов [1, 3–7, 10]
В. ИИ в перевозочном процессе и диспетчеризации	Оптимизация решений при сбоях, конфликт-менеджмент; ускоряют за счёт быстрого пересчёта допустимых решений и повышения устойчивости графика [2, 11]
С. Пропускная способность и планирование графика	Методы измерения и анализа потребления мощности и их расширения; ускоряют за счёт снижения конфликтов и более плотного, но устойчивого графика [12, 13]
Д. Мониторинг и предиктивное обслуживание инфраструктуры	Компьютерное зрение и диагностические модели, систематические обзоры по переходу к predictive maintenance; ускоряют через снижение отказов и числа внеплановых ограничений скорости [8, 9]
Е. Цифровые платформы и экосистемы логистики	Снятие транзакционных задержек (документы, согласования, прослеживаемость); ускоряют через сокращение времени координации и снижение неопределённости на стыках [17–19]
Ф. Технологическая автоматизация грузовых операций	Сокращение времени операций и маневровых процедур в узлах; инфраструктурная база для «цифровых грузовых поездов» и масштабирования ИИ-сервисов [21–25]
Г. Стандарты и программы цифровизации	Нормативно-техническая рамка совместимости данных и интерфейсов, позволяющая тиражировать решения на масштабе сети [20, 26]

**Цифровые двойники и ИИ как «ядро» ускорения**

Современные обзоры подчёркивают, что цифровой двойник в железнодорожных приложениях следует трактовать как «живую» модель, которая синхронизируется с реальным объектом или процессом на потоках данных, поддерживает моделирование сценариев и используется для принятия решений в эксплуатации, ремонте и планировании [1, 3, 6]. На уровне архитектуры всё чаще обсуждается связка «ИИ-усиленный цифровой двойник», в которой алгоритмы ИИ обучаются на данных двойника, оценивают альтернативы в условиях неопределённости и ускоряют выбор управленческого решения [3].

Обобщая результаты работ по цифровым двойникам в промышленности и транспортных системах, можно выделить типовой механизм формирования эффекта ускорения: 1) сокращение времени выявления отклонений (мониторинг + аналитика); 2) сокращение времени локализации причин (сопоставление сценариев в модели); 3) ускорение принятия решения (поддержка решений/ИИ); 4) снижение частоты сбоев за счёт предиктивных вмешательств; 5) рост устойчивости графика и уменьшение внеплановых ограничений [4–6]. Отдельные исследования демонстрируют применение цифровых двойников в железнодорожной инфраструктуре (например, стрелочные переводы) и в задачах прогнозирования грузопотоков и пассажиропотоков, что важно для устойчивости расписаний и управления ресурсами [7, 10].

**ИИ для диспетчеризации и пересчёта планов**

Движение поездов определяется графиком, а локальные сбои часто приводят к каскадным задержкам. В этой зоне ИИ рассматривается как средство повышения скорости реакции и качества решений на коротких горизонтах, где классические методы оптимизации не всегда позволяют быстро разработать допустимый план [2]. Перспективным направлением является применение обучения с подкреплением для very-short term rescheduling на ограниченных участках, когда критично быстро находить решения с учётом встреч, обгонов и ограничений ресурсов [11]. Для логистики принципиален не

только факт пересчёта, но и повышение предсказуемости сроков доставки и сокращение простоев в ожидании «окон».

### ***Управление пропускной способностью и конфликтами графика***

Инфраструктурная мощность является фундаментальным ограничением ускорения потоков. В мировой практике применяются методы измерения и анализа потребления пропускной способности на основе «компрессии» графика и их развития для современных сетей и условий эксплуатации [12, 13]. Практический вывод состоит в том, что ускорение достигается через переход от разрозненных расчётов к непрерывному цифровому управлению мощностью: измерение текущей занятости, прогноз на горизонтах планирования и прозрачные правила приоритизации.

### ***Мониторинг состояния и предиктивное обслуживание как фактор ускорения***

Снижение числа отказов и внеплановых ограничений скорости непосредственно влияет на сроки доставки. Методы компьютерного зрения и глубокого обучения показали применимость для инспекции пути и выявления дефектов [8]. Систематические обзоры по мониторингу железнодорожной инфраструктуры фиксируют переход от «классической диагностики» к predictive maintenance, увязанному с управлением жизненным циклом объектов [9]. В рамках цифровых двойников это реализуется как замкнутый контур «наблюдение – прогноз – вмешательство», уменьшающий вероятность каскадных задержек.

### ***Российская практика: ДМЗИ как инструмент ускорения через управление доступом к мощности***

ДМЗИ применяется для согласования заявок на перевозку с учётом текущей и прогнозной загрузки инфраструктуры. С точки зрения логистики ДМЗИ можно рассматривать как «операционную цифровую модель мощности», связывающую инфраструктурные ограничения, планируемые поездопотоки/технологические окна и поток клиентских заявок. В научных публикациях отмечено, что ускорение достигается не увеличением технической скорости, а снижением перегрузок и конфликтов на лимитирующих участках за счёт фильтрации и переноса заведомо невыполнимых заявок [14]. Нормативная база, регламентирующая технологию работы ДМЗИ при согласовании заявок, подчёркивает важность интеграции данных и единых правил доступа к мощности [15].

Ключевой исследовательский вопрос связан с балансом эффективности и предсказуемости: чем жёстче модель ограничивает заявки по мощности, тем выше требования к прозрачности критериев, качеству прогнозов и механизмам объяснимости решений. В прикладных работах по управлению перевозочным процессом это рассматривается как задача настройки правил приоритизации и организации взаимодействия участников на горизонтах «сутки – неделя – месяц» [16].

### ***Платформенные механизмы и «снятие транзакционных задержек»***

Значительная доля задержек возникает не из-за физики движения, а из-за времени согласований, документов, поиска ресурсов и координации участников. Исследования по цифровым платформам и экосистемам транспортно-логистического обслуживания подчёркивают роль сквозной прослеживаемости, цифровых сервисов заказа перевозки и предиктивной аналитики для уменьшения неопределённости на стыках цепочки [17–19]. В контексте ИИ это формирует спрос на модели прогнозирования ETA, выявление рисков сбоев и рекомендации по перераспределению ресурсов.

### ***Стандарты и технологическая автоматизация как условие масштабирования***

Для развитых железнодорожных систем характерно внедрение ИИ-сервисов в среде, где данные стандартизированы, а интерфейсы совместимы. В Европе такую рамку формируют спецификации и программы семейства ERTMS/ETCS/ATO и смежные цифровые инициативы [20]. Для грузового комплекса важным «ускорителем» считается переход к цифровой автосцепке (DAC), которая сокращает время операций и создаёт основу для сквозных цифровых поездов и автоматизации процессов формирования составов [21–25]. Национальные программы цифровизации (например, проекты цифровой железной дороги) демонстрируют практику применения цифровых двойников для повышения эффективности эксплуатации на масштабе сети [26].

### ***Выводы***

1 В современной научной литературе ускорение транспортных потоков на железных дорогах трактуется прежде всего как повышение эффективности управления мощностью и устойчивостью процесса, а не как максимизация технической скорости.

2 Цифровые двойники и ИИ формируют эффект ускорения через сокращение времени реакции на отклонения и переход к предиктивному управлению состоянием инфраструктуры и эксплуатацией.

3 ИИ в диспетчеризации наиболее перспективен на коротких горизонтах и в задачах пересчёта планов при сбоях, где критична скорость получения допустимого решения.

4 Российская ДМЗИ является значимым примером цифрового управления доступом к инфраструктурной мощности; дальнейшие исследования целесообразно направлять на прозрачность правил, качество прогнозов и объяснимость решений.

5 Масштабирование эффектов ускорения требует стандартизированной цифровой среды (ERTMS/ETCS/ATO, цифровые платформы) и технологической автоматизации узловых операций (DAC).

### Список литературы

1 Revolutionizing railway systems : A systematic review of digital twin technologies / E. A. Thompson, P. Lu, P. K. Alimo [et al.] // High-speed Railway. – 2025. – Vol. 3, Issue 3. – P. 238–250. – DOI 10.1016/j.hspr.2025.05.005.

2 A literature review of Artificial Intelligence applications in railway systems / R. Tang, L. De Donato, N. Bešinović [et al.] // Transportation Research Part C : Emerging Technologies. – 2022. – Vol. 140. – Art. 103679.

3 Towards AI-assisted digital twins for smart railways : Preliminary guideline and reference architecture / L. De Donato, R. Dirnfeld, A. Somma [et al.] // Journal of Reliable Intelligent Environments. – 2023. – Vol. 9, No. 3. – P. 303–317.

4 Digital twin in industry : State-of-the-art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15, No. 4. – P. 2405–2415.

5 **Errandonea, I.** Digital twin for maintenance : A literature review / I. Errandonea, S. Beltrán, S. Arrizabalaga // Computers in Industry. – 2020. – Vol. 123. – Art. 103316.

6 Enabling technologies and tools for digital twin / O. Qi, F. Tao, T. Hu [et al.] // Journal of Manufacturing Systems. – 2021. – Vol. 58. – P. 3–21.

7 **Kaewunruen, S.** Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems / S. Kaewunruen, Q. Lian // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 228. – P. 1537–1551.

8 **Gibert, X.** Deep multitask learning for railway track inspection / X. Gibert, V. M. Patel, R. Chellappa // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2017. – Vol. 18, No. 1. – P. 153–164.

9 Systematic review railway infrastructure monitoring : From classic techniques to predictive maintenance / G. Bianchi, C. Fanelli, F. Freddi [et al.] // Advances in Mechanical Engineering. – 2025. – Vol. 17, No. 1. – DOI 10.1177/16878132241285631.

10 Rail Transit Digital Twin and Deep Learning for Passenger Flow Prediction / X. Ou, T. Shi, Z. Duan [et al.] // Electronics. – 2025. – Vol. 14, No. 9. – Art. 1758. – DOI 10.3390/electronics14091758.

### References

1 Revolutionizing railway systems : A systematic review of digital twin technologies / E. A. Thompson, P. Lu, P. K. Alimo [et al.] // High-speed Railway. – 2025. – Vol. 3, Issue 3. – P. 238–250. – DOI 10.1016/j.hspr.2025.05.005.

2 A literature review of Artificial Intelligence applications in railway systems / R. Tang, L. De Donato, N. Bešinović [et al.] // Transportation Research Part C : Emerging Technologies. – 2022. – Vol. 140. – Art. 103679.

3 Towards AI-assisted digital twins for smart railways : Preliminary guideline and reference architecture / L. De Donato, R. Dirnfeld, A. Somma [et al.] // Journal of Reliable Intelligent Environments. – 2023. – Vol. 9, No. 3. – P. 303–317.

4 Digital twin in industry : State-of-the-art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15, No. 4. – P. 2405–2415.

5 **Errandonea, I.** Digital twin for maintenance : A literature review / I. Errandonea, S. Beltrán, S. Arrizabalaga // Computers in Industry. – 2020. – Vol. 123. – Art. 103316.

6 Enabling technologies and tools for digital twin / O. Qi, F. Tao, T. Hu [et al.] // Journal of Manufacturing Systems. – 2021. – Vol. 58. – P. 3–21.

7 **Kaewunruen, S.** Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems / S. Kaewunruen, Q. Lian // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 228. – P. 1537–1551.

8 **Gibert, X.** Deep multitask learning for railway track inspection / X. Gibert, V. M. Patel, R. Chellappa // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2017. – Vol. 18, No. 1. – P. 153–164.

9 Systematic review railway infrastructure monitoring : From classic techniques to predictive maintenance / G. Bianchi, C. Fanelli, F. Freddi [et al.] // Advances in Mechanical Engineering. – 2025. – Vol. 17, No. 1. – DOI 10.1177/16878132241285631.

10 Rail Transit Digital Twin and Deep Learning for Passenger Flow Prediction / X. Ou, T. Shi, Z. Duan [et al.] // Electronics. – 2025. – Vol. 14, No. 9. – Art. 1758. – DOI 10.3390/electronics14091758.

- 11 **Liu, Y.** A reinforcement learning approach to solving very-short term train rescheduling problem for a single-track rail corridor / Y. Liu, L. Lin, T. Liu // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. – 2024. – Art. 100483. – DOI 10.1016/j.jrtpm.2024.100483.
- 12 Extending UIC 406-based capacity analysis / N. Weik, F. Corman, G. Medeossi, I. Johansson // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. – 2020. – Vol. 15. – Art. 100199.
- 13 **Landex, A.** Capacity measurement with the UIC 406 capacity method / A. Landex // *Computers in Railways X : Proceedings of the 10th International Conference on Railway Engineering Design and Operation*. – 2008.
- 14 **Власова, Н. В.** Ключевые аспекты функционирования динамической модели загрузки инфраструктуры ОАО «Российские железные дороги» / Н. В. Власова, В. А. Оленцевич // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2023. – № 4 (80). – С. 148–157. – DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).148-157.
- 15 Об утверждении Технологии работы Динамической модели загрузки инфраструктуры ОАО «РЖД» при согласовании заявок ГУ-12 и заявок на порожние : распоряжение от 25 ноября 2022 г. N 3090/р (ред. 11.07.2023) : нормативный документ. – URL: [cargo.rzd.ru/api/media/resources/2532460](http://cargo.rzd.ru/api/media/resources/2532460) (дата обращения: 10.02.2026).
- 16 **Зябилов, Х. Ш.** Современные технологии в управлении перевозочным процессом на железнодорожном транспорте : монография / Х. Ш. Зябилов, И. Н. Шапкин // *Финансы и статистика*. – 2-е изд. – Москва, 2024. – 484 с. – ISBN 978-5-00184-112-8.
- 17 **Гулый, И. М.** Теория и методология экономической оценки цифровых платформенных решений в сфере грузовых смешанных перевозок на основе железнодорожного транспорта : специальность 5.2.3 «Региональная и отраслевая экономика» : диссертация на соискание ученой степени доктора экономических наук / И. М. Гулый. – Санкт-Петербург, 2024. – 338 с.
- 18 **Дмитриев, А. В.** Формирование и развитие цифровых экосистем транспортно-логистического обслуживания : специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством» (логистика) : диссертация на соискание ученой степени доктора экономических наук / А. В. Дмитриев. – Санкт-Петербург, 2021. – 410 с.
- 19 **Маслов, Е. С.** Разработка методов управления транспортно-экспедиционной деятельностью на основе интеллектуальных информационных технологий : специальность 05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические»
- 11 **Liu, Y.** A reinforcement learning approach to solving very-short term train rescheduling problem for a single-track rail corridor / Y. Liu, L. Lin, T. Liu // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. – 2024. – Art. 100483. – DOI 10.1016/j.jrtpm.2024.100483.
- 12 Extending UIC 406-based capacity analysis / N. Weik, F. Corman, G. Medeossi, I. Johansson // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. – 2020. – Vol. 15. – Art. 100199.
- 13 **Landex, A.** Capacity measurement with the UIC 406 capacity method / A. Landex // *Computers in Railways X : Proceedings of the 10th International Conference on Railway Engineering Design and Operation*. – 2008.
- 14 **Vlasova, N. V.** Key aspects of the functioning of the dynamic model of infrastructure loading of JSC Russian Railways / N. V. Vlasova, V. A. Olenцевич // *Modern technologies. Systems analysis. Modeling*. – 2023. – No. 4 (80). – P. 148–157. – DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).148-157.
- 15 On approval of the Technology for the operation of the Dynamic Model of Infrastructure Loading of JSC Russian Railways when coordinating GU-12 applications and applications for empty trains : order of November 25, 2022 No. 3090/r (as amended on July 11, 2023) : regulatory document. – URL: [cargo.rzd.ru/api/media/resources/2532460](http://cargo.rzd.ru/api/media/resources/2532460) (date of access: 10.02.2026).
- 16 **Zyabirov, Kh. Sh.** Modern technologies in managing the transportation process in railway transport : monograph / H. Sh. Zyabirov, I. N. Shapkin // *Finance and statistics*. – 2nd ed. – Moscow, 2024. – 484 p. – ISBN 978-5-00184-112-8.
- 17 **Gulyy, I. M.** Theory and methodology of economic evaluation of digital platform solutions in the field of freight mixed transportation based on rail transport : specialty 5.2.3 "Regional and sectoral economics" : dissertation for the degree of doctor of economical sciences / I. M. Gulyy. – St. Petersburg, 2024. – 338 p.
- 18 **Dmitriev, A. V.** Formation and development of digital ecosystems of transport and logistics services : specialty 08.00.05 "Economics and Management of the National Economy" (logistics) : dissertation for the degree of doctor of economical sciences / A. V. Dmitriev. – St. Petersburg, 2021. – 410 p.
- 19 **Maslov, E. S.** Development of methods for managing transport and forwarding activities based on intelligent information technologies : specialty 05.22.01 "Transport and transport-technological

системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте»: автореферат диссертации кандидата технических наук / Е. С. Маслов. – Москва, 2019. – 24 с.

20 European Union Agency for Railways. Mandatory specifications (ETCS, GSM-R, FRMCS, ATO). – URL: <https://www.era.europa.eu/era-folder/1-ccs-tsi-appendix-mandatory-specifications-etcs-b4-r1-rmr-gsm-r-b1-mr1-frmcs-b0-ato-b1> (дата обращения: 24.01.2026).

21 Europe’s Rail Joint Undertaking. Digital Automatic Coupling (DAC) Factsheet. – URL: <https://rail-research.europa.eu/wp-content/uploads/2020/11/DAC-Factsheet.pdf> (дата обращения: 24.01.2026).

22 Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (Germany). Technical Report : “DAC Technology” – URL: <https://www.railwaypro.com/wp/germany-presents-dac-study> (дата обращения: 24.01.2026).

23 Federal Ministry for Digital and Transport (Germany). DAC Demonstrator – Interim Report on the Completion of Phase II. – URL: <https://www.railwaypro.com/wp/operational-tests-begin-for-dac-freight-train/> (дата обращения: 24.01.2026).

24 International Union of Railways (UIC). European Digital Automatic Coupling (DAC) : key element for the Green Deal modal shift. – URL: <https://uic.org/com/enews/article/european-digital-automatic-coupling-dac-key-element-for-the-green-deal-modal> (дата обращения: 24.01.2026).

25 Verband der Güterwagenhalter in Deutschland (VPI). Digital automatic coupling. – URL: <https://vpihamburg.de/en/topics/dac> (дата обращения: 24.01.2026).

26 Deutsche Bahn. Digitale Schiene Deutschland : Digital twin enables efficient rail operations. – URL: <https://digitale-schiene-deutschland.de/en> (дата обращения: 24.01.2026).

systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport" : abstract of the dissertation of candidate of technical sciences / E. S. Maslov. – Moscow, 2019. – 24 p.

20 European Union Agency for Railways. Mandatory specifications (ETCS, GSM-R, FRMCS, ATO). – URL: <https://www.era.europa.eu/era-folder/1-ccs-tsi-appendix-mandatory-specifications-etcs-b4-r1-rmr-gsm-r-b1-mr1-frmcs-b0-ato-b1> (date of access: 24.01.2026).

21 Europe’s Rail Joint Undertaking. Digital Automatic Coupling (DAC) Factsheet. – URL: <https://rail-research.europa.eu/wp-content/uploads/2020/11/DAC-Factsheet.pdf> (date of access: 24.01.2026).

22 Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (Germany). Technical Report : “DAC Technology” – URL: <https://www.railwaypro.com/wp/germany-presents-dac-study> (date of access: 01/24/2026).

23 Federal Ministry for Digital and Transport (Germany). DAC Demonstrator – Interim Report on the Completion of Phase II – URL: <https://www.railwaypro.com/wp/operational-tests-begin-for-dac-freight-train/> (date of access: 24.01.2026).

24 International Union of Railways (UIC). European Digital Automatic Coupling (DAC) : key element for the Green Deal modal shift. – URL: <https://uic.org/com/enews/article/european-digital-automatic-coupling-dac-key-element-for-the-green-deal-modal> (date of access: 24.01.2026).

25 Verband der Güterwagenhalter in Deutschland (VPI). Digital automatic coupling. – URL: <https://vpihamburg.de/en/topics/dac> (date of access: 24.01.2026).

26 Deutsche Bahn. Digitale Schiene Deutschland : Digital twin enables efficient rail operations. – URL: <https://digitale-schiene-deutschland.de/en> (date of access: 24.01.2026).

*A. T. Osminin, T. A. Malakhova, A. S. Ryashchikov, I. I. Osminina*

## REVIEW OF RESEARCH ON THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND DIGITAL TWINS FOR ACCELERATING RAILWAY TRANSPORT FLOWS

**Abstract.** The paper provides a scientific review of Russian and international research devoted to increasing the speed and reliability of rail transportation through digitalization and artificial Intelligence (AI) technologies. The analysis shows that the “acceleration” effect is typically achieved by an integrated set of solutions: digital twins of infrastructure and the transportation process, intelligent planning and dispatching, capacity management and predictive maintenance, platform mechanisms for interaction between participants, and technological automation of operations at junctions (including the use of digital automatic couplings). A special focus is given to the Russian practice of coordinating shipments based on the Dynamic Infrastructure Load Model (DILM) as a tool for managing access to infrastructure capacity.

**Keywords:** railway logistics, artificial intelligence, digital twin, dispatching, capacity management, DIML, predictive maintenance, digital platforms.

**For citation:** Review of research on the application of artificial intelligence and digital twins for accelerating railway transport flows / A. T. Osminin, T. A. Malakhova, A. S. Ryashchikov, I. I. Osminina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 36–42. – DOI 10.46973/0201–727X\_2026\_1\_36.

#### **Сведения об авторах**

##### **Осьминин Александр Трофимович**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),  
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: at@osminin.com

##### **Малахова Татьяна Александровна**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),  
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: malakhova2004@yandex.ru

##### **Рящиков Александр Сергеевич**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),  
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент, научный сотрудник,  
e-mail: ras1951@mail.ru

##### **Осьминина Ирина Ивановна**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),  
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,  
кандидат технических наук, доцент,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: osminina@inbox.ru

#### **Information about the authors**

##### **Osminin Aleksandr Trofimovich**

Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University (PSTU),  
Chair “Operational Management”,  
Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
e-mail: at@osminin.com

##### **Malakhova Tatyana Aleksandrovna**

Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University (PSTU),  
Chair “Operational Management”,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: malakhova2004@yandex.ru

##### **Ryashchikov Aleksandr Sergeevich**

Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University (PSTU),  
Chair “Operational Management”,  
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Associate Professor, Research Fellow,  
e-mail: ras1951@mail.ru

##### **Osminina Irina Ivanovna**

Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University (PSTU),  
Chair “Operational Management”,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
Senior Researcher,  
e-mail: osminina@inbox.ru

*Е. А. Середов, А. П. Осипов*

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРИБЫТИЯ И РАСФОРМИРОВАНИЯ ПОЕЗДОВ НА СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ

**Аннотация.** Описан механизм применения методов имитационного моделирования для анализа и оптимизации технологических процессов на сортировочных станциях в условиях цифровизации железнодорожного транспорта. Основное внимание уделено первой фазе переработки вагонов – прибытию и расформированию поездов. С использованием программного комплекса AnyLogic разработана имитационная модель, воспроизводящая логику взаимодействия между подразделениями железнодорожного транспорта. Модель обеспечивает визуализацию технологического цикла, оценку влияния изменения параметров – времени обработки состава, численности бригад, интервалов прибытия – на пропускную способность станции, а также выявление узких мест в технологической цепочке. Установлены аналитические условия синхронизации потоков прибытия, обработки и расформирования, формализованные в виде неравенств. Процесс моделирования завершается либо по истечении заданного времени, либо при достижении критического уровня заполнения парка приема, что позволяет оценить предельную пропускную способность станции при заданных технологических и инфраструктурных ограничениях. Полученные результаты могут быть использованы на этапах проектирования, модернизации и оперативного управления сортировочными станциями.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, визуализация процессов, сортировочная станция, переработка вагонов, технологический процесс, AnyLogic, цифровизация.

**Для цитирования:** Середов, Е. А. Имитационная модель прибытия и расформирования поездов на сортировочной станции / Е. А. Середов, А. П. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 43–50. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_43.

### **Введение**

Современный этап развития железнодорожного транспорта характеризуется стремительной цифровизацией и внедрением интеллектуальных технологий управления инфраструктурой. На фоне роста объемов перевозок и усложнения логистических цепочек возрастает потребность в точном прогнозировании и оптимизации технологических процессов на сортировочных станциях. В этих условиях особую значимость приобретает метод имитационного моделирования, позволяющий воспроизводить динамику реальных систем в виртуальной среде, выявлять узкие места и тестировать управленческие решения без риска для функционирования реального объекта.

Одним из ключевых этапов технологического цикла на сортировочной станции является переработка вагонов, которая традиционно делится на три взаимосвязанных этапа:

- 1) прибытие и расформирование поездов;
- 2) накопление вагонов и формирование поездов, включая перестановку их в парк отправления;
- 3) обработка и отправление сформированных поездов.

В рамках данной работы основное внимание уделяется первому этапу – прибытию и расформированию поездов, поскольку именно на этом этапе закладываются условия для стабильной и бесперебойной работы всей станции. Нарушение баланса между темпами прибытия поездов и их обработкой может привести к образованию очередей на обработку, заполнению путей парка приема и, в конечном счете, к остановке приема составов. В имитационной модели этот риск учитывается путем введения динамических ограничений, связанных с максимально допустимым числом составов в парке приема, и моделирования логики приостановки приема поездов при достижении критического уровня загрузки станции. В перспективе это открывает возможность интеграции модели в систему поддержки принятия решений в реальном времени, где имитационная среда будет выступать в роли цифрового двойника сортировочной станции, способного не только прогнозировать, но и оперативно адаптировать управленческие воздействия в ответ на изменяющиеся условия эксплуатации.

Для обеспечения прозрачности методологии и оперативного восприятия результатов в начало работы введены основные показатели процесса моделирования: интенсивность прибытия поездов, нормативы времени обработки состава и расформирования на горке, количество маневровых

локомотивов. Эксперименты выполнены по трем сценариям: базовому, для условий повышенной нагрузки и критическому.

Несмотря на акцент на первом этапе переработки вагонов, его результаты напрямую определяют загрузку последующих фаз: задержки в расформировании ведут к снижению интенсивности поступления вагонов в сортировочный парк, что, в свою очередь, нарушает процесс накопления и формирования составов. Таким образом, устойчивость всей технологической цепочки зависит от синхронизации именно начального этапа.

Для анализа и визуализации этапа прибытия и расформирования поездов в работе применяется метод имитационного моделирования. В отечественной научной литературе этому направлению посвящены труды ряда исследователей: П. А. Козлова, С. П. Вакуленко, В. С. Колокольникова, разработавших систему автоматизированного управления сортировочной станции, основанную на трех моделях [1]; Л. Н. Иванковой, А. В. Бураковой, предложивших подходы к определению пропускной способности станций [2]; работы С. В. Карасева и Д. А. Сивицкого, посвященные применению имитационного моделирования для определения варианта организации многогруппной сортировки [3].

Несмотря на значительный вклад указанных авторов в исследование технологического цикла на сортировочной станции с помощью метода имитационного моделирования, в большинстве публикаций недостаточно внимания уделяется детализации начального этапа переработки – прибытию и расформированию составов, что особенно актуально при высокой неравномерности поступления поездов. Модель, реализованная в среде AnyLogic с использованием дискретно-событийного подхода, позволяет точно учитывать временные параметры операций и инфраструктурные ограничения станции.

#### *Анализ технологических условий первой фазы переработки вагонов*

Первая фаза переработки вагонов включает в себя взаимодействие прилегающих участков, парка приема, сортировочной горки (или вытяжных путей на станциях без сортировочных горок), пунктов технического обслуживания (ПТО) и коммерческого осмотра (ПКО), а также станционного технического центра. Стабильность работы станции на этом этапе определяется соблюдением ряда условий, обеспечивающих синхронизацию потоков.

Во-первых, интенсивность обработки поездов в парке приема должна быть не ниже интенсивности их прибытия. Это условие формализуется неравенством:

$$\frac{B_{\Pi}}{t_{\Pi}} \geq \frac{1}{I_{\Pi}^p}, \quad (1)$$

где  $B_{\Pi}$  – число бригад ПТО/ПКО;  
 $t_{\Pi}$  – нормативное время обработки одного состава;  
 $I_{\Pi}^p$  – расчетный интервал прибытия поездов.

Невыполнение неравенства (1) приводит к накоплению составов в парке приема, что со временем приводит к блокировке дальнейшего приема поездов. В подобной ситуации возможны два решения: либо снизить интенсивность подачи поездов, либо повысить производительность их обработки.

Во-вторых, интенсивность расформирования составов должна быть не ниже интенсивности завершения их обработки в парке приема [4]. Для станций с горкой это условие формализуется неравенством:

$$\frac{1}{t_{\text{гор}}} \geq \frac{B_{\Pi}}{t_{\Pi}}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{гор}}$  – горочный технологический интервал.  
 Для станций без горок аналогичное условие принимает вид:

$$\frac{M_p}{t_p} \geq \frac{B_{\Pi}}{t_{\Pi}}, \quad (3)$$

где  $M_p$  – число маневровых локомотивов, участвующих в расформировании поездов;  
 $t_p$  – среднее время на расформирование состава одним локомотивом.  
 Если предположить, что количество бригад не ограничено, неравенства (2) и (3) примут вид:

– для станций с горкой:

$$\frac{1}{t_{\text{гор}}} \geq \frac{1}{I_{\text{п}}^{\text{п}}}, \quad (4)$$

– для станций без горок:

$$\frac{M_{\text{р}}}{t_{\text{р}}} \geq \frac{1}{I_{\text{п}}^{\text{п}}}. \quad (5)$$

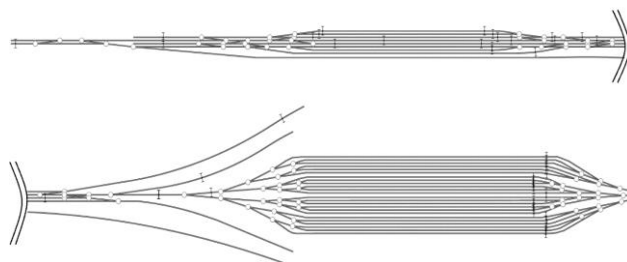
Приведенные выше неравенства подчеркивают необходимость синхронизации всех операций первой фазы переработки вагонов: задержка на любом этапе немедленно приводит к снижению общей пропускной способности станции.

### ***Имитационная модель прибытия и расформирования поездов на сортировочной станции***

Для визуализации и анализа первой фазы переработки была разработана имитационная модель в среде AnyLogic. Модель включает в себя следующие ключевые элементы инфраструктуры:

- парк приема, состоящий из восьми путей, разделенный на секции для одновременного приема поездов с противоположных направлений;
- сортировочный парк, состоящий из 24 путей;
- один путь надвига;
- один путь роспуска.

Схема путевого развития станции [5] в имитационной модели представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Схема путевого развития станции в имитационной модели**

На путях установлены точки, разграничивающие этапы движения подвижного состава. Расформирование составов выполняется двумя горочными локомотивами.

В модели установлено:

- среднесуточное поступление составов – 42 поезда/сут ( $\approx 1,75$  поезда/ч);
- среднее время обработки состава в парке приема (ПТО + ПКО) – 30 мин;
- горочный технологический интервал – 20 мин.

При этом интенсивность вывода составов с горки (3 состава/ч) превышает интенсивность поступления (1,75 состава/ч), что теоретически обеспечивает устойчивость.

Сравнение интенсивностей подтверждает необходимость условий (1)–(5):

- при  $B_{\text{п}} = 2$ ,  $t_{\text{п}} = 30$  мин  $\rightarrow$  максимальная интенсивность обработки =  $2/0,5 = 4$  состава/ч;
- при  $t_{\text{гор}} = 20$  мин  $\rightarrow$  интенсивность расформирования =  $60/20 = 3$  состава/ч;
- при  $I_{\text{п}}^{\text{п}} = 34,3$  мин  $\rightarrow$  интенсивность прибытия = 1,75 состава/ч.

Таким образом, установлено, что узким местом в технологической цепочке пропуска составов является горка ( $3 < 4$ ). В то же время при увеличении интенсивности поступления до 4 составов/ч пропускная способность станции оказывается недостаточной как на этапе обработки, так и на этапе расформирования. Однако наименьшей в указанной цепочке по-прежнему остается пропускная способность сортировочной горки. Это подтверждает вывод о том, что даже при высокой загрузке парка приема горка будет выступать лимитирующим фактором, если не произведено ее усиление.

### ***Показатели процесса моделирования и сценарии экспериментов***

Моделирование проводилось по трем сценариям, отражающим различные режимы эксплуатации станции (табл. 1).

Таблица 1

## Сценарии моделирования

Сценарий	Интенсивность поступления, составов/ч
Базовый	1,75
Повышенной нагрузки	2,5
Критический	3,5

Каждый сценарий моделировался в течение 5 ч. Сравнительные показатели по сценариям моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Сравнительные показатели по сценариям моделирования

Показатель	Сценарий		
	базовый	повышенной нагрузки	критический
Средний простой состава в парке приема, мин	60	64	76
Все поезда приняты	да	да	нет
Блокировка парка приема	нет	нет	да
Загрузка горки, %	52	75	100

Анализ показывает, что даже при увеличении интенсивности до 2,5 состава/ч средний простой состава в парке приема увеличивается с 60 до 64 мин, что свидетельствует о сохранении устойчивости технологического процесса. Однако при дальнейшем росте интенсивности до 3,5 состава/ч система переходит в критический режим: средний простой состава в парке приема возрастает до 76 мин, к концу 5-часового периода происходит блокировка парка приема.

Последовательность проведения экспериментов реализована в виде блок-схемы, представленной на рис. 2.

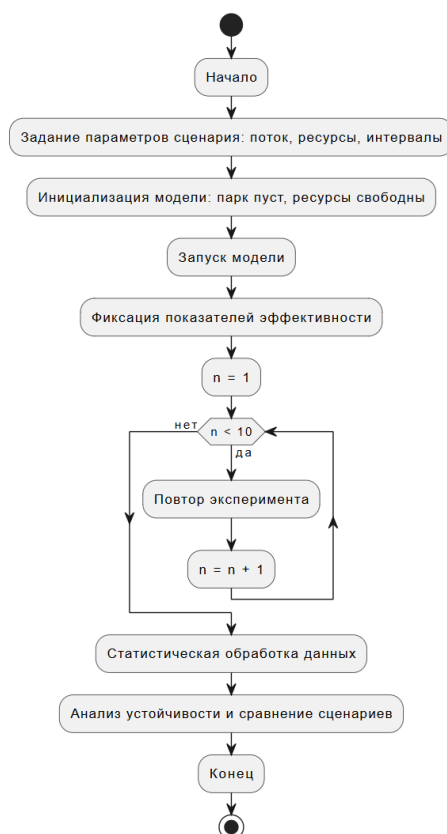


Рис. 2. Блок-схема последовательности проведения экспериментов

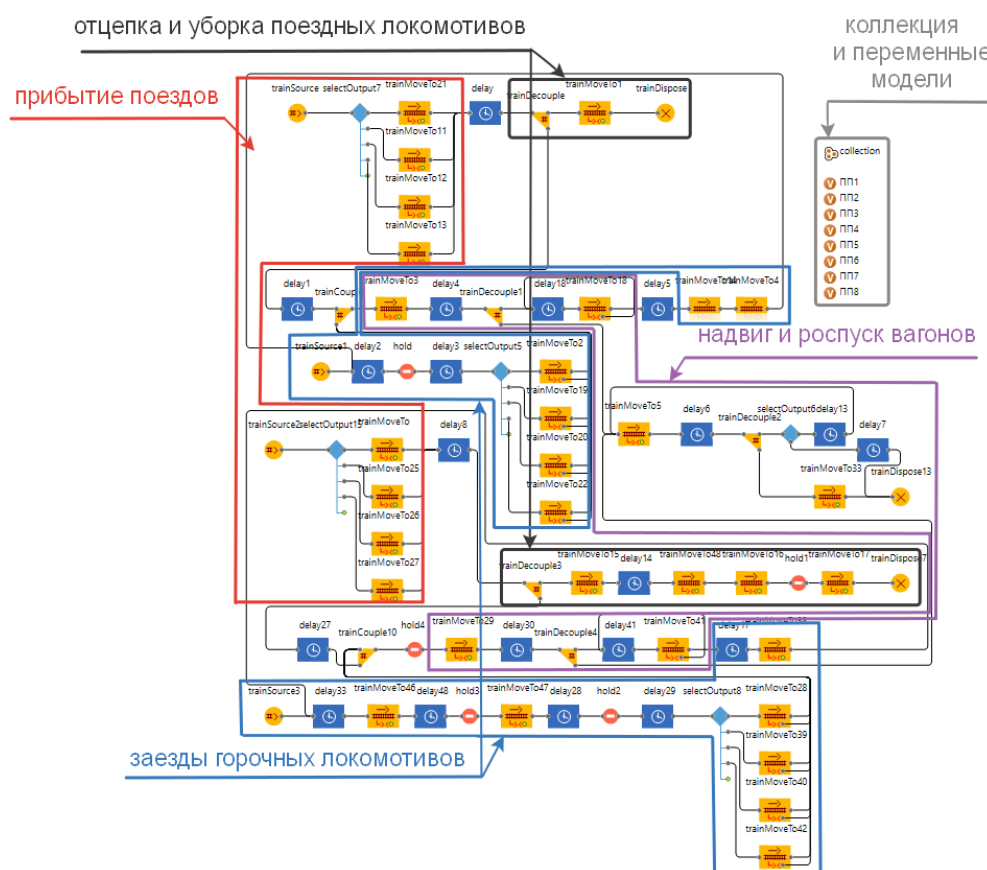
Таким образом, описанный выше подход к сценарному анализу на основе имитационной модели позволяет оперативно оценить риски перегрузки элементов станции и обосновать необходимость усиления обработки поездов.

### *Алгоритм имитационной модели прибытия и расформирования поездов*

Прибывающие в расформирование поезда принимаются на пути парка приема. После остановки состав закрепляется, от него отцепляется поездной локомотив, который направляется в локомотивное депо. Далее устанавливается ограждение, после чего производится техническое обслуживание и коммерческий осмотр вагонов. По завершении этих операций ограждение снимается, и к составу подается горочный локомотив для надвига на горку и последующего роспуска в соответствии с сортировочным листком [6–8].

В программной среде AnyLogic [9] описанный технологический процесс реализован следующим образом: модель предусматривает генерацию поездов, поступающих в разборку, на главных путях, а горочных локомотивов – в противоположных горловинах парка приема. Уборка поездных локомотивов предусматривается на ходовом пути, ведущем к локомотивному хозяйству. Горочные локомотивы направляются к составам, подлежащим расформированию, после завершения ожидания, связанного с выполнением операций по ограждению, техническому обслуживанию, коммерческому осмотру и снятию ограждения. Надвиг состава выполняется до точки разъединения отцепов. Цикл разъединения отцепов повторяется до тех пор, пока состав не будет полностью расформирован. После завершения роспуска состава горочный локомотив направляется в противоположную горловину парка, откуда следует к следующему составу, подлежащему расформированию.

Алгоритм моделирования, реализованный в виде логической цепочки в среде AnyLogic (рис. 3), отражает авторскую методику воспроизведения технологического цикла первой фазы переработки вагонов.



**Рис. 3. Алгоритм имитационной модели прибытия и расформирования поездов, реализованный в среде AnyLogic**

Важной особенностью модели является учет реальной последовательности технологических операций и их взаимной зависимости: каждая следующая стадия (например, подача горочного локомо-

тива) инициируется только после подтверждения завершения предыдущей (например, окончания операций по обработке состава). Такой подход обеспечивает высокую степень достоверности имитации и позволяет корректно оценивать влияние факторов, таких как количество бригад ПТО/ПКО, непредвиденные задержки при осмотре или неравномерность прибытия поездов. Благодаря этому модель не только воспроизводит штатный режим работы, но и способна имитировать сбои и экстремальные нагрузки, что особенно ценно при оценке устойчивости технологического процесса и разработке резервных сценариев управления.

Следует отметить, что в текущей версии модели не предусмотрено формирование и отправление составов – она фокусируется исключительно на первом этапе. Моделирование прекращается по истечении отведенного на него времени или при достижении критического уровня заполнения парка приема, что позволяет оценить максимальную пропускную способность станции при заданных параметрах.

### **Выводы**

Разработанная имитационная модель прибытия и расформирования поездов на сортировочной станции, реализованная в AnyLogic [10–12], представляет собой эффективный инструмент для анализа и оптимизации технологических процессов. Модель позволяет:

- визуализировать последовательность операций и взаимодействие между подразделениями;
- оценить влияние изменений штатного расписания, времени обработки или инфраструктурных параметров на технологические показатели станции;
- выявлять узкие места и прогнозировать последствия их игнорирования.

Применение имитационного моделирования особенно актуально на этапе проектирования или модернизации станций, когда необходимо опробовать технические и организационные решения без риска для реальной эксплуатации. Это не только снижает финансовые и временные затраты на натурные испытания, но и повышает обоснованность принимаемых решений. В отличие от существующих моделей предложенная имитационная система интегрирует подразделения железнодорожного транспорта в единую модель с учетом аналитических условий синхронизации потоков и реальной топологии станции, что позволяет более точно оценивать предельную пропускную способность по сравнению с традиционными методами расчета.

В перспективе планируется расширить модель за счет включения второй и третьей фаз переработки, а также интеграции внешних факторов, таких как колебания графика движения, отказы техники или изменение состава поездов. Это позволит создать комплексную цифровую копию станции, пригодную для стратегического планирования и оперативного управления.

### **Список литературы**

- 1 **Козлов, П. А.** О построении интеллектуальных систем управления железнодорожными станциями / П. А. Козлов, С. П. Вакулenco, В. С. Колокольников // Наука и техника транспорта. – 2019. – № 2. – С. 70–76. – ISSN 2074-9325. – EDN UHBNMQ.
- 2 **Иванкова, Л. Н.** Определение пропускной способности станций с учетом емкости путевого развития / Л. Н. Иванкова, А. В. Буракова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 3 (59). – С. 92–98. – DOI 10.26731/1813-9108.2018.3(59).92-98.
- 3 **Карасев, С. В.** Обоснование рациональных конструктивных и технологических параметров вариантов организации многогруппной сортировки на основе имитационного моделирования / С. В. Карасев, Д. А. Сивицкий // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2017. – Т. 76, № 2. – С. 94–100. – DOI 10.21780/2223-9731-2017-76-2-94-100.

### **References**

- 1 **Kozlov, P. A.** On Building Intelligent Railway Station Management Systems / P. A. Kozlov, S. P. Vakulenco, V. S. Kolokolnikov // Science and Technology of Transport. – 2019. – No. 2. – P. 70–76. – ISSN 2074-9325. – EDN UHBNMQ.
- 2 **Ivankova, L. N.** Determining the capacity of stations, taking into account the capacity of track development / L. N. Ivankova, A. V. Burakova // Modern Technologies. System Analysis. Modeling. – 2018. – No. 3 (59). – P. 92–98. – DOI 10.26731/1813-9108.2018.3(59).92-98.
- 3 **Karasev, S. V.** Justification of rational design and technological parameters of options for organizing a multi-group sorting based on simulation modeling / S. V. Karasev, D. A. Sivitsky // Russian Railway Science Journal (Vestnik VNIIZhT). – 2017. – Vol. 76, No. 2. – P. 94–100. – DOI 10.21780/2223-9731-2017-76-2-94-100.

4 Управление эксплуатационной работой (в примерах и задачах) / А. Ф. Бородин, Е. С. Максимова, Е. В. Бородина [и др.]. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2024. – 328 с. – ISBN 978-5-907695-65-8.

5 Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) : учебник / Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, А. К. Головнич [и др.] ; под редакцией Н. В. Правдина и С. П. Вакуленко. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 1086 с. – ISBN 978-5-89035-619-2.

6 **Бородина, Е. В.** Управление эксплуатационной работой. Разработка технологического процесса работы сортировочной станции : учебно-методическое пособие / Е. В. Бородина, Н. В. Бессонова, В. Н. Шмаль. – Москва : РУТ МИИТ, 2025. – 152 с.

7 Расчет технических средств и технологических нормативов работы сортировочной станции : методические указания / А. Э. Александров, Е. Н. Тимухина, Н. В. Кашеева, Е. Е. Смородинцева. – Екатеринбург : УрГУПС, 2016. – 51 с.

8 **Алаев, М. М.** Проект новой сортировочной станции с автоматизированной горкой в железнодорожном узле : учебное пособие / М. М. Алаев, И. А. Иванов-Толмачев – Москва : РУТ МИИТ, 2020. – 84 с.

9 **Евреенова, Н. Ю.** Выбор параметров транспортно-пересадочных узлов, формируемых с участием железнодорожного транспорта : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.00 / Евреенова Надежда Юрьевна. – Москва, 2015. – 197 с. – EDN FYTNHZ.

10 **Середов, Е. А.** Имитационное моделирование выполнения маневров на вытяжных путях / Е. А. Середов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (90). – С. 73–78. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_73.

11 **Маликов, Р. Ф.** Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6 : учебное пособие / Р. Ф. Маликов. – Уфа : БГПУ, 2013. – 296 с. – ISBN 978-5-87978-862-4.

12 **Ремезова, Е. М.** Имитационное моделирование в среде AnyLogic : лабораторный практикум / Е. М. Ремезова // Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : ВлГУ, 2017. – 87 с. – ISBN 978-5-9984-0806-9.

4 Management of operational work (in examples and tasks) / A. F. Borodin, E. S. Maksimova, E. V. Borodina [et al.]. – Moscow : EMC RT, 2024. – 328 p. – ISBN 978-5-907695-65-8.

5 Designing the railway transport infrastructure (stations, railway and transport hubs) : a textbook / N. V. Pravdin, S. P. Vakulenko, A. K. Golovnich [et al.] ; edited by N. V. Pravdin and S. P. Vakulenko. – Moscow : FSBEI “Educational and Methodological Center for Education on Railway Transport”, 2012. – 1086 p. – ISBN 978-5-89035-619-2.

6 **Borodina, E. V.** Management of operational work. Development of the technological process of operation of a marshalling yard : educational and methodological manual / E. V. Borodina, N. V. Bessonova, V. N. Shmal. – Moscow : RUT MIIT, 2025. – 152 p.

7 Calculation of technical means and technological standards for the operation of a marshalling yard : methodological guidelines / A. E. Aleksandrov, E. N. Timukhina, N. V. Kashcheeva, E. E. Smorodintseva. – Yekaterinburg : USURT, 2016. – 51 p.

8 **Alaev, M. M.** Design of a new marshalling yard with an automated hump in a railway junction : a tutorial / M. M. Alaev, I. A. Ivanov-Tolmachev – Moscow : RUT MIIT, 2020. – 84 p.

9 **Evreenova, N. Yu.** Selection of parameters of transport and transfer hubs formed with the participation of railway transport : dissertation for the degree of candidate of technical sciences : 05.22.00 / Evreenova Nadezhda Yurievna. – Moscow, 2015. – 197 p. – EDN FYTNHZ.

10. **Seredov, E. A.** Simulation modeling of maneuvers on draw-out tracks / E. A. Seredov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 2 (90). – P. 73–78. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_73.

11 **Malikov, R. F.** Workshop on simulation modeling of complex systems in the AnyLogic 6 environment : a textbook / R. F. Malikov. – Ufa : BSPU, 2013. – 296 p. – ISBN 978-5-87978-862-4.

12 **Remezova, E. M.** Simulation modeling in the AnyLogic environment : laboratory workshop / E. M. Remezova // Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletov. – Vladimir : VISU, 2017. – 87 p. – ISBN 978-5-9984-0806-9.

*E. A. Seredov, A. P. Osipov*

### **SIMULATION MODEL OF TRAINS ARRIVAL AND BREAKING-UP AT THE MARSHALLING YARD**

**Abstract.** The mechanism of application of simulation modeling methods for the analysis and optimization of technological processes at marshalling yards in the context of digitalization of railway transport is described. The main focus is on the first phase of car processing, which involves the arrival and breaking-up of trains. Using the AnyLogic software package, a simulation model has been developed that reproduces the logic of interaction between railway transport units. The model provides visualization of the technological cycle, assessment of the impact of changes in parameters such as processing time, crew size, and arrival intervals on the station's capacity, and identification of bottlenecks in the technological chain. Analytical conditions for synchronizing the arrival, processing, and disbanding flows have been established and formalized as inequalities. The modeling process is completed either after a specified time or when the critical level of the reception yard occupancy is reached, which allows to estimate the limit capacity of the station under given technological and infrastructure constraints. The results obtained can be used at the stages of design, modernization and operational management of marshalling yards.

**Keywords:** simulation modeling, process visualization, marshalling yard, processing of wagons, technological process, AnyLogic, digitalization.

**For citation:** Seredov, E. A. Simulation model of trains arrival and breaking-up at the marshalling yard / E. A. Seredov, A. P. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 43–50. – DOI 10.46973/0201–727X\_2026\_1\_43.

#### **Сведения об авторах**

**Середов Евгений Александрович**

Российский университет транспорта (МИИТ),  
кафедра «Железнодорожные станции  
и транспортные узлы»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: evgeniy.seredov@mail.ru

**Осипов Александр Петрович**

Центр инновационного развития –  
филиал ОАО «РЖД»,  
ведущий технолог,  
e-mail: osipoff.sanya2010@yandex.ru

#### **Information about the authors**

**Seredov Evgeniy Alexandrovich**

Russian University of Transport (RUT MIIT),  
Chair “Railway Stations and Transport Hubs”,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: evgeniy.seredov@mail.ru

**Osipov Alexander Petrovich**

Center for Innovative Development –  
branch of JSC “Russian Railways”,  
Leading Technologist,  
e-mail: osipoff.sanya2010@yandex.ru

С. А. Тихненко, К. В. Некрасов

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КООПЕРАТИВНОЙ КОНСОЛИДАЦИИ МЕЛКОПАРТИОННЫХ ГРУЗОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

**Аннотация.** В условиях роста мелкопартионных грузопотоков и дефицита терминальной инфраструктуры традиционные хабовые модели железнодорожных сборных перевозок теряют экономическую эффективность. В статье предложена разработанная авторами имитационная модель кооперативной консолидации (грузового пулинга), основанная на прямом взаимодействии географически близких отправителей без участия посредника. Модель учитывает стохастическую природу объемов грузов и числа кооператоров, использует эмпирическое распределение Вейбулла и метод Монте-Карло для оценки вероятности экономической целесообразности пулинга. Результаты позволяют определить пороговые значения минимального объема якорного отправителя и тарифа для кооператоров, обеспечивающие 95 %-ную вероятность выгодности операции.

**Ключевые слова:** железнодорожные перевозки, мелкопартионные грузы, кооперативная консолидация, грузовой пулинг, имитационное моделирование, цифровая логистическая платформа, транзакционные издержки.

**Для цитирования:** Тихненко, С. А. Имитационная модель кооперативной консолидации мелкопартионных грузов на железнодорожном транспорте / С. А. Тихненко, К. В. Некрасов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 51–58. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_51.

### **Введение**

В последние годы во всем мире растет спрос на перевозку мелкопартионных тарно-штучных грузов, что обусловлено развитием электронной коммерции, стремлением бизнеса сократить затраты на накопление и хранение запасов, ростом требований потребителя к скорости доставки от момента заказа товара до момента его получения.

В структуре перевозок сборных грузов традиционно лидирует автотранспорт. Вместе с тем сегодня во всем мире обеспокоены экологическим ущербом, вызванным ростом автомобилизации. Основным подходом к решению этой проблемы, помимо использования альтернативных источников энергии, является снижение доли автотранспорта в пользу более экологичных железных дорог. Организация железнодорожных перевозок сборных грузов актуальна также по причине проблемы дефицита транспортной инфраструктуры. В условиях критических ограничений пропускной способности железных дорог востребованы технологии, направленные на повышение эффективности загрузки перевозочных ресурсов [1]. Консолидация партий разных отправителей в одном вагоне или контейнере позволит повысить степень использования вместимости и грузоподъемности подвижного состава, что отвечает задаче рационального использования инфраструктуры.

Традиционная организация сборных железнодорожных перевозок основана на хабовой модели (*hub-and-spoke*), при которой мелкие партии от разных отправителей доставляются на центральный консолидирующий терминал, где формируются полные вагонные или контейнерные отправки. Этой модели посвящены, например, исследования [2–5]. Однако в условиях роста мелкопартионных грузопотоков, дефицита терминально-складской инфраструктуры и высоких транзакционных издержек хабовый подход оказывается недостаточно гибким и экономически неэффективным.

На этом фоне набирают актуальность децентрализованные решения, опирающиеся на принципы экономики совместного использования: пулинг грузов без промежуточного терминала [6], шеринг транспортных ресурсов [7–8] и цифровые платформы для прямого взаимодействия участников логистического процесса [9–10].

В качестве альтернативы хабовой модели в работе [11] впервые предложена концепция кооперативной консолидации, или грузового железнодорожного пулинга. Суть подхода заключается в том, что географически близкие отправители объединяют свои мелкие партии непосредственно в одном вагоне или контейнере, иницируемом так называемым якорным отправителем («якорем»). Остальные участники, именуемые «кооператоры» и не имеющие достаточного объема для самостоятельной отправки, присоединяются к «якорю», используя его подвижной состав. Взаимодействие осуществляется

через цифровую пулинг-платформу – децентрализованную информационную систему, обеспечивающую полный жизненный цикл кооперативной консолидации.

Несмотря на активное развитие подобных моделей в автотранспорте, их применение в железнодорожной логистике остается слабо изученным, что определяет научную новизну настоящего исследования, базирующегося на предварительной разработке авторов [11].

Цель настоящего исследования – разработать модель, имитирующую процесс консолидации мелких партий груза в сборном вагоне или контейнере с целью оценить экономическую целесообразность грузового пулинга и определить оптимальные параметры инициации такой отправки.

### Материалы и методы

При реализации технологии кооперативной консолидации мелких отправок железнодорожным транспортом требуется оценить ее эффективность для каждого участника и определить параметры подключения к кооперации. В работе авторов [11] представлена методика обоснования целесообразности грузового железнодорожного пулинга.

Якорному отправителю выгодно инициировать подключение к его отправке сторонних кооператоров при условии, что общие затраты на кооперативную консолидацию  $TC_{\text{pull}}$  не превышают стоимость автономной отправки в не полностью загруженном вагоне  $TC_a$  и мелкой отправки через хаб транспортной компании  $TC_x$ , т. е.:

$$TC_{\text{pull}} < \min (TC_a, TC_x). \quad (1)$$

При известных провозной плате повагонной (контейнерной) отправки  $C_{\text{жд}}$ , транзакционных затратах взаимодействия с каждым кооператором  $C_t$ , числе кооператоров  $N$ , цене отправки одной тонны груза кооператора  $p$  и объеме отправки  $i$ -го кооператора  $v_i$  условие целесообразности грузового железнодорожного пулинга примет вид:

$$p \sum_{i=1}^N v_i \geq C_t \cdot N + \max(0, C_{\text{жд}} - p_x V_0). \quad (2)$$

Экономический смысл условия (2) заключается в следующем: доход «якоря» от размещения грузов кооператоров (левая часть неравенства) должен быть достаточен для покрытия транзакционных издержек на взаимодействие с ними ( $C_t N$ ) и потенциальной надбавки за автономную отставку по сравнению с альтернативой через хаб ( $\max [0, C_{\text{жд}} - p_x V_0]$ ). Если отставка через хаб дешевле, чем самостоятельная вагонная отставка, эта разница также должна компенсироваться за счет дохода от кооператоров.

На основе условия (2) в работе [11] также сформированы выражения для оценки минимального объема груза якорного отправителя и минимальной цены присоединения к кооперативной консолидации:

$$p_{\min} = \frac{C_t \cdot N + C_{\text{жд}} - p_x V_0}{\sum_{i=1}^N v_i}. \quad (3)$$

$$V_0^{\min} = \frac{C_t \cdot N + C_{\text{жд}} - p \sum_{i=1}^N v_i}{p_x}. \quad (4)$$

Данные выражения позволяют определить, какую  $p_{\min}$  должен установить якорный отправитель за отставку груза кооператора в своем вагоне (контейнере) и каким минимальным объемом собственного груза  $V_0^{\min}$  он должен располагать, чтобы инициация пулинга была для него выгодна.

Формулы (3) и (4) справедливы, если число кооператоров  $N$  и объемы их партий  $v_i$  заранее известны. Однако до момента консолидации эти величины являются случайными, и прогнозировать их можно лишь с определенной вероятностью. Поэтому обоснование  $p_{\min}$  и  $V_0^{\min}$  возможно только на основе имитационного моделирования.

На первоначальном этапе разработки модели необходимо провести статистический анализ ключевых характеристик мелких отправок и сформировать прогнозную модель, которая будет оценивать вероятностный диапазон или ожидаемое значение объема одной мелкой отправки.

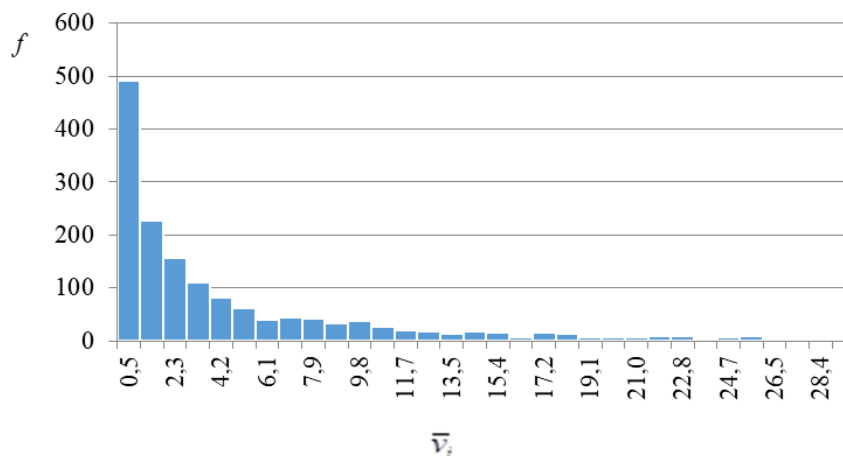
Имеются выборочные ретроспективные данные о размере мелких отправок на железнодорожном транспорте в объеме 1545 наблюдений, данные варьируются от 0,02 до 29 тонн.

Сгруппируем эти данные и построим интервальный ряд распределения.

Для определения оптимальной ширины интервала воспользуемся правилом Фридмана – Диакониса, которое минимизирует разницу между гистограммой и истинной плотностью распределения данных. Выбор данного метода обусловлен наличием большого объема данных с асимметричным распределением, где стандартное правило Стерджеса может давать слишком мало интервалов.

По правилу Фридмана – Диакониса получено оптимальное значение ширины интервала  $h = 0,93$  и их количества  $k = 32$ .

На основе полученных расчетов построим частотную гистограмму (рис. 1).



**Рис. 1. Частотная гистограмма величины мелких отправок груза по железной дороге**

Исходя из предоставленного частотного ряда, распределение веса одной отправки не соответствует стандартным симметричным распределениям (нормальному, равномерному). Наблюдается резко выраженная правосторонняя асимметрия. Наиболее вероятным здесь представляется экспоненциальный закон распределения. Однако наблюдаемое слабое отклонение от строгого монотонного убывания указывает на возможную сложность формы распределения. Данная особенность позволяет предположить, что анализируемые данные могут также соответствовать гамма-распределению, распределению Вейбулла или логнормальному распределению. Для обоснованного выбора между этими гипотезами (экспоненциальным, гамма-, Вейбулла и логнормальным) и подтверждения адекватности любой из них необходима формальная статистическая проверка согласия эмпирического распределения с теоретическим. Наиболее целесообразным представляется применение критерия Колмогорова-Смирнова.

Результаты теста распределений представлены в таблице.

#### Результаты проверки гипотез о законах распределения величины мелкой отправки груза железнодорожным транспортом

Распределение	Параметры	Критерий Колмогорова – Смирнова $D$	Уровень значимости $p$
Экспоненциальное	$\lambda = 4,62$	0,153	$3,27 \cdot 10^{-32}$
Гамма-	$\alpha = 0,63,$ $\beta = 7,37$	0,047	0,0020
Логнормальное	$\sigma = 1,66,$ $e^{\mu} = 1,75$	0,070	$3,53 \cdot 10^{-7}$
Вейбулла	$c = 0,73,$ $\lambda = 3,82$	0,031	0,1002

Среди протестированных распределений только распределение Вейбулла демонстрирует адекватное соответствие эмпирическим данным на основе критерия Колмогорова – Смирнова. Гипотезы о соответствии экспоненциальному, гамма- и логнормальному распределениям были статистически зна-

чимо отвергнуты из-за крайне малых  $p$ -значений, указывающих на существенные различия между теоретическими моделями и наблюдаемыми данными. Значение параметра формы Вейбулла  $c = 0,73 < 1$  согласуется с первоначальным описанием данных: интенсивное убывание частот сразу после моды (первый интервал) и длинный правый «хвост». Таким образом, оно является наиболее обоснованной (среди проверенных) вероятностной моделью для описания распределения величины мелкой отправки груза железнодорожным транспортом.

Вероятность подключения к отправке груза весом  $x$  следует из формулы плотности вероятности Вейбулла:

$$f(x) = \frac{c}{\lambda} \left( \frac{x}{\lambda} \right)^{c-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^c}. \quad (5)$$

При известных  $c = 0,73$ ,  $\lambda = 3,82$  получим:

$$f(x) = 0,191 \cdot x^{-0,27} \cdot e^{-0,402x^{0,73}}. \quad (6)$$

На основе проведенного статистического исследования мы можем прогнозировать величину одной мелкой отправки как случайной величины и имитировать процесс заполнения свободного объема вагона. Многократное проигрывания сценариев заполнения выгона позволит определить оптимальные параметры кооперативной консолидации, т. е.  $p_{\min}$  и  $V_0^{\min}$ , при которых инициация пулинга выгодна.

Предлагается следующий алгоритм.

Пусть имеется два оптимизируемых параметра –  $p_{\min}$  и  $V_0^{\min}$ .

Введем критерий оптимальности  $P_{\text{цель}}$  – доля успешных реализаций экспериментов, при которой достигается условие экономической выгоды пулинга (1). Примем  $P_{\text{цель}} = 0,95$ ; это означает, что мы принимаем значения  $p_{\min}$  и  $V_0^{\min}$  в качестве оптимальных, если 95 % прогонов модели с этими параметрами показали выполнение условия экономической целесообразности (1).

Исходными параметрами модели являются:

- фиксированная стоимость вагонной (контейнерной) отправки ( $C_{\text{жд}}$ );
- удельные транзакционные издержки на кооператора ( $C_{\text{т}}$ );
- тариф хаба за отправку тонны груза ( $p_x$ );
- максимальная вместимость подвижного состава ( $V_{\text{max}}$ );
- распределение объема мелких отправок (закон Вейбулла:  $c = 0,73$ ,  $\lambda = 3,82$ ).

В основе алгоритма лежит метод Монте-Карло: на каждом шаге генерируются заявки отправителей с объемами, соответствующими распределению Вейбулла, до заполнения доступной вместимости вагона. Для каждого эксперимента верифицируется условие экономической целесообразности (1). По итогам серии прогонов рассчитывается доля успешных реализаций  $P_{\text{цель}}$ , удовлетворяющих данному условию.

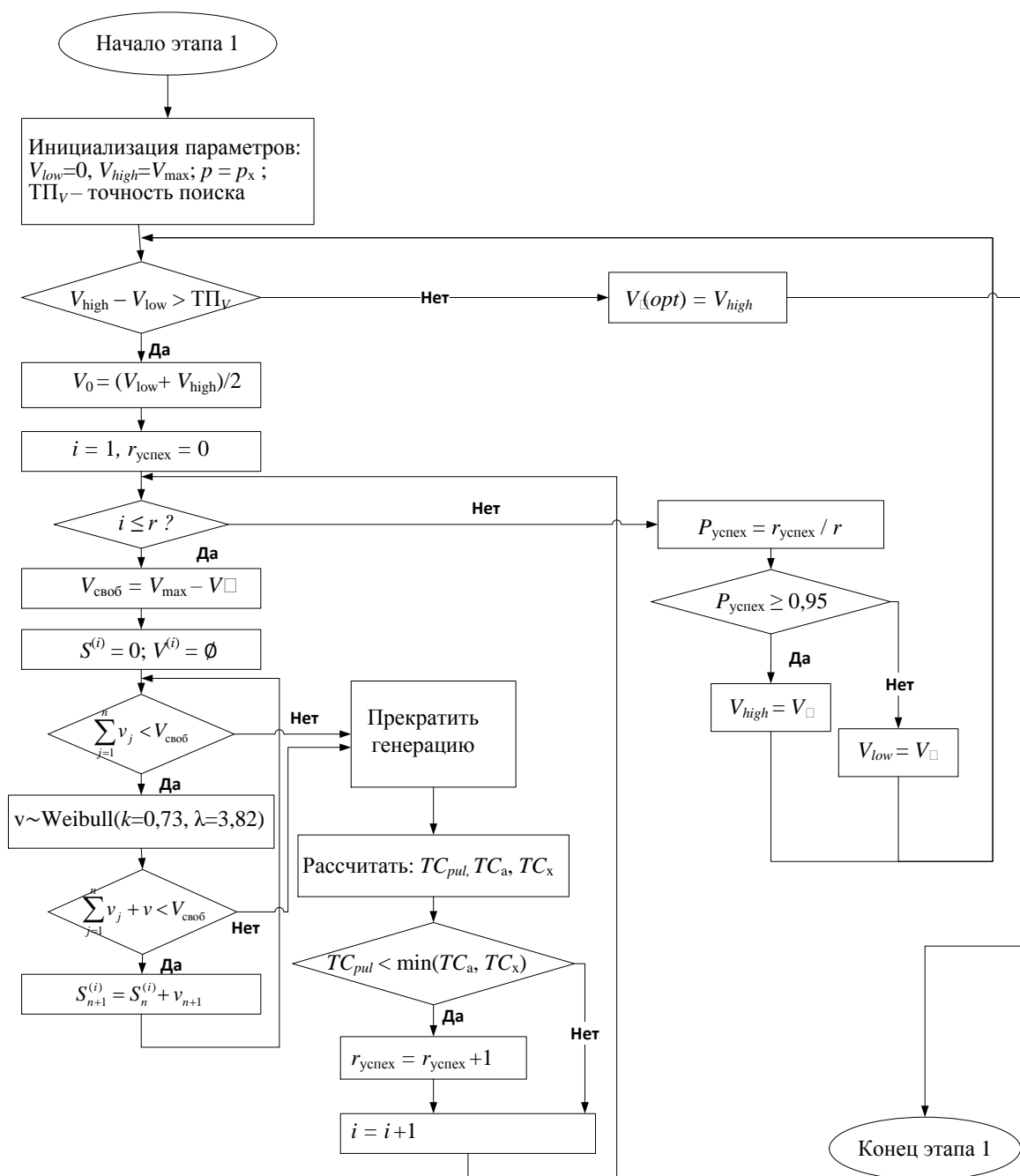
Вычислительная сложность подхода заключается в высокой вычислительной нагрузке, так как прямой перебор  $n$  значений объема  $V_0$  и  $m$  значений тарифов  $p$  при  $r$  количестве экспериментов для каждой пары потребует  $n \cdot m \cdot r$  операций, что непрактично для реальных расчетов. Дополнительную сложность вносит стохастическая природа модели – необходимость многократной генерации случайных величин для статистической значимости результатов.

Для преодоления этих ограничений реализуем двухэтапную оптимизацию: на первом этапе методом бисекции определим минимальный объем груза якорного отправителя при фиксированном тарифе, на втором – для установленного объема аналогично оптимизируем тарифную ставку. Метод бисекции заключается в постепенном сужении интервала, на котором находится искомое значение, удовлетворяющее целевой функции. Данный подход существенно сократит вычислительную нагрузку при сохранении точности.

Блок-схема первого этапа алгоритма представлена на рис. 2.

Результат выполнения первого этапа – нахождение такого  $V_0$ , дальнейшее снижение которого приводит к снижению вероятности успеха  $P_{\text{успех}}$ , т. е.  $V_0^{\min} = V_{\text{high}}$ .

Блок-схема второго этапа формируется аналогично, но вместо  $V_0$  методом бисекции определяется минимальная тарифная ставка  $p_{\min}$ , а  $V_0^{\min}$  фиксируется. Результат выполнения второго этапа – нахождение такого  $p$ , дальнейшее снижение которого приводит к снижению вероятности успеха  $P_{\text{успех}}$ , т. е.  $p_{\min} = p_{\text{high}}$ .



**Рис. 2. Блок-схема первого этапа алгоритма оптимизации параметров кооперативной консолидации (железнодорожного грузового пулинга)**

Для повышения надежности оценки также предлагается выполнить финальную проверку, где найденные параметры  $p_{\min}$  и  $V_0^{\min}$  фиксируются и на основе ряда прогонов вычисляется итоговая вероятность успеха  $P_{\text{фин}}$ . Если по итогам выполнения финальной проверки  $P_{\text{фин}} < 0,95$ , то выполняется возврат к этапу 1 с новыми границами переменных, иначе производится фиксация оптимальных параметров.

### Результаты

Предложенная имитационная модель кооперативной консолидации мелкопартионных грузов устраняет ключевой недостаток ранее разработанных [11] аналитических подходов, учитывая стохастическую природу объемов грузов кооператоров и вариативность их числа. Путем многократной имитации на основе эмпирического распределения данных, модель вычисляет вероятность выгодности кооперативной консолидации относительно других стратегий, предоставляя операторам статистически значимые критерии для принятия решений.

Область применения модели включает:

- поддержку принятия решений на цифровых пулинг-платформах;
- проектирование тарифных стратегий для инициаторов кооперативных отправок;
- оценку потенциала внедрения пулинга в регионах с низкой плотностью грузопотоков и ограниченной терминальной инфраструктурой;
- сравнительный анализ эффективности пулинга и традиционных хабовых схем.

### Обсуждение

Направления дальнейших исследований включают:

- интеграцию ограничений по совместимости грузов на основе классификаторов ЕТСНГ;
- разработку алгоритмов отбора и виртуальной консолидации грузов;
- программную реализацию модели и проведение вычислительных экспериментов с реальными параметрами железнодорожной сети.

Таким образом, разработанная модель представляет собой методическую основу для практического внедрения технологии грузового железнодорожного пулинга в условиях цифровой трансформации логистики.

### Список литературы

- 1 **Мачерет, Д. А.** Изменение неравномерности перевозок и загрузки инфраструктуры на железнодорожном транспорте в условиях экономической трансформации / Д. А. Мачерет, А. Д. Разуваев, А. Ю. Ледней // Экономика железных дорог. – 2024. – № 3. – С. 13–26. – ISSN 1727-6500.
- 2 Перевозка сборных грузов в инновационных паллетных вагонах / Ю. П. Бороненко, О. Д. Покровская, Т. С. Титова [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 4. – С. 59–62. – ISSN 0044-4448.
- 3 **Ботцин, Д. В.** Совершенствование организации контейнерных перевозок на основе консолидации участников транспортного процесса : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.01 / Ботцин Дмитрий Васильевич. – Ростов-на-Дону, 2012. – 20 с.
- 4 **Сергеева, Т. Г.** Перспективные технологии доставки мелких отправок на основе принципов логистики : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.08 / Сергеева Татьяна Георгиевна. – Санкт-Петербург, 2002. – 262 с.
- 5 **Акулов, А. М.** Совершенствование технологии перевозки мелких отправок сборными крупнотоннажными контейнерами в мультимодальных сообщениях : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.01 / Акулов Антон Михайлович. – Москва, 2013. – 226 с.
- 6 **Mrabti, N.** The pooling of sustainable freight transport / N. Mrabti, N. Hamani, L. Delahoche // Journal of the Operational Research Society. – 2020. – Vol. 72, No. 5. – P. 1–16. – DOI 10.1080/01605682.2020.1772022.

### References

- 1 **Macheret, D. A.** Changes in the unevenness of freight flows and infrastructure utilization in railways under conditions of economic transformation / D. A. Macheret, A. D. Razuvayev, A. Yu. Ledney // Railway Economy. – 2024. – No. 3. – P. 13–26. – ISSN 1727-6500.
- 2 Transportation of consolidated cargo in innovative pallet wagons / Yu. P. Boronenko, O. D. Pokrovskaya, T. S. Titova [et al.] // Railway Transport. – 2021. – No. 4. – P. 59–62. – ISSN 0044-4448.
- 3 **Botsvin, D. V.** Improvement of container transportation organization based on the consolidation of participants in the transport process : abstract of the thesis for the degree of candidate of technical sciences : 05.22.01 / Botsvin Dmitriy Vasilyevich. – Rostov-on-Don, 2012. – 20 p.
- 4 **Sergeeva, T. G.** Advanced technologies for delivering small consignments based on logistics principles : dissertation for the degree of candidate of technical sciences : 05.22.08 / Sergeeva Tatyana Georgievna. – Saint Petersburg, 2002. – 262 p.
- 5 **Akulov, A. M.** Improvement of transportation technology of small shipments by combined large-capacity containers in multimodal transport : dissertation for the degree of candidate of technical sciences : 05.22.01 / Akulov Anton Mikhailovich. – Moscow, 2013. – 226 p.
- 6 **Mrabti, N.** The pooling of sustainable freight transport / N. Mrabti, N. Hamani, L. Delahoche // Journal of the Operational Research Society. – 2020. – Vol. 72, No. 5. – P. 1–16. – DOI 10.1080/01605682.2020.1772022.

7 **Кочнева, Д. И.** Оптимизация схемы возврата порожних контейнеров путем использования системы контейнершеринга / Д. И. Кочнева, Н. Ю. Пономарев // *Инновационный транспорт*. – 2023. – № 3 (49). – С. 64–68. – DOI 10.20291/2311-164X-2023-3-64-68.

8 Sharing economy benefits and sustainable development goals: Empirical evidence from the transportation industry of Vietnam / M. Sadiq [et al.] // *Journal of Innovation & Knowledge*. – 2023. – Vol. 8, No. 1. – Article no. 100290. – DOI 10.1016/j.jik.2022.100290.

9 **Duan, C.** Thematic evolution, emerging trends for sharing economy business model research, and future research directions in the post-COVID-19 era / C. Duan // *R&D Management*. – 2024. – Vol. 54, No. 5. – P. 1104–1130. – DOI 10.1111/radm.12636.

10 **Rechavi, A.** Crowd logistics: Understanding auction-based pricing and couriers' strategies in crowdsourcing package delivery / A. Rechavi, E. Toch // *Journal of Intelligent Transportation Systems Technology Planning and Operations*. – 2020. – Vol. 26, No. 1. – P. 1–16. – DOI 10.1080/15472450.2020.1797503.

11 **Некрасов, К. В.** Концепция организации железнодорожных перевозок сборных грузов в условиях технологии кооперативной консолидации / К. В. Некрасов, С. А. Тихненко // *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. – 2025. – № 4 (45). – С. 80–85. – DOI 10.31079/2415-8658-2025-4-80-85.

7 **Kochneva, D. I.** Optimization of empty container return scheme by using container-sharing system / D. I. Kochneva, N. Yu. Ponomarev // *Innovative transport*. – 2023. – No. 3 (49). – P. 64–68. – DOI 10.20291/2311-164X-2023-3-64-68.

8 Sharing economy benefits and sustainable development goals: Empirical evidence from the transportation industry of Vietnam / M. Sadiq [et al.] // *Journal of Innovation & Knowledge*. – 2023. – Vol. 8, No. 1. – Article no. 100290. – DOI 10.1016/j.jik.2022.100290.

9 **Duan, C.** Thematic evolution, emerging trends for sharing economy business model research, and future research directions in the post-COVID-19 era / C. Duan // *R&D Management*. – 2024. – Vol. 54, No. 5. – P. 1104–1130. – DOI 10.1111/radm.12636.

10 **Rechavi, A.** Crowd logistics: Understanding auction-based pricing and couriers' strategies in crowdsourcing package delivery / A. Rechavi, E. Toch // *Journal of Intelligent Transportation Systems Technology Planning and Operations*. – 2020. – Vol. 26, No. 1. – P. 1–16. – DOI 10.1080/15472450.2020.1797503.

11 **Nekrasov, K. V.** The concept of organizing railway transportation of consolidated cargoes under cooperative consolidation technology / K. V. Nekrasov, S. A. Tikhnenko // *Pacific Rim countries transportation system*. – 2025. – No. 4 (45). – P. 80–85. – DOI 10.31079/2415-8658-2025-4-80-85.

*S. A. Tikhnenko, K. V. Nekrasov*

## A SIMULATION MODEL OF COOPERATIVE CONSOLIDATION OF SMALL-BATCH FREIGHT ON RAILWAY TRANSPORT

**Abstract.** Under the conditions of growing small-batch freight flows and the shortage of terminal infrastructure, traditional hub models of combined rail transportation lose their economic efficiency. This paper proposes a simulation model of cooperative consolidation (freight pooling) developed by the authors which is based on direct interaction among geographically proximate shippers without intermediaries. The model accounts for the stochastic nature of cargo volumes and the number of cooperators, employs an empirical Weibull distribution, and applies the Monte Carlo method to estimate the probability of economic feasibility of pooling. The results enable determination of the threshold values of the minimum volume of the anchor shipper and the tariff for cooperators, providing a 95% probability of operational profitability.

**Keywords:** railway transportation, small-batch freight, cooperative consolidation, freight pooling, simulation modeling, digital logistics platform, transaction costs.

**For citation:** Tikhnenko, S. A. A simulation model of cooperative consolidation of small-batch freight on railway transport / S. A. Tikhnenko, K. V. Nekrasov // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*. – 2026. – No. 1. – P. 51–58. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_51.

**Сведения об авторах**

**Тихненко Сергей Александрович**  
Уральский государственный университет  
путей сообщения (УрГУПС),  
кафедра «Мировая экономика  
и логистика»,  
аспирант,  
e-mail: Tikhnenko.s@gmail.com

**Некрасов Константин Викторович**  
Уральский государственный университет  
путей сообщения (УрГУПС),  
кафедра «Мировая экономика  
и логистика»,  
кандидат экономических наук, доцент,  
e-mail: ekonn@bk.ru

**Information about the authors**

**Tikhnenko Sergey Aleksandrovich**  
Ural State University  
of Railway Transport (USURT),  
Chair “World Economy and Logistics”,  
Postgraduate Student,  
e-mail: Tikhnenko.s@gmail.com

**Nekrasov Konstantin Viktorovich**  
Ural State University  
of Railway Transport (USURT),  
Chair “World Economy and Logistics”,  
Candidate of Economic Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: ekonn@bk.ru

М. О. Фонсека

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСПЕШНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНСАМБЛЕВЫХ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**Аннотация.** В работе решается научно-практическая задача повышения объективности отбора проектов присоединения железнодорожных путей необщего пользования к инфраструктуре общего пользования. Предложен метод прогнозирования успешности реализации проектов на основе ансамблевых методов машинного обучения. Научная новизна заключается в разработке и экспериментальном обосновании моделей прогнозирования, использующих многокритериальные показатели проектов в качестве признакового пространства, а также в применении SHAP-анализа для интерпретации результатов. Практическая значимость работы состоит в создании алгоритмического обеспечения, позволяющего снизить долю неэффективных инвестиций за счёт предварительной оценки рисков нереализации заявленных объёмов перевозок.

**Ключевые слова:** автоматизация управления, железнодорожные пути необщего пользования, прогнозирование, машинное обучение, XGBoost, SHAP-анализ.

**Для цитирования:** Фонсека, М. О. Прогнозирование успешности реализации проектов присоединения железнодорожных путей необщего пользования с использованием ансамблевых методов машинного обучения / М. О. Фонсека // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 59–65. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_59.

### **Введение**

Процесс принятия решений о присоединении новых или реконструкции существующих железнодорожных путей необщего пользования (ЖДППП) к инфраструктуре общего пользования ОАО «РЖД» в условиях растущего дефицита пропускной способности требует объективных и формализованных методов сравнительной оценки конкурирующих проектов [1, 2]. Через пути необщего пользования проходит свыше 85 % грузооборота сети, что определяет их стратегическую значимость для национальной транспортной системы.

Действующая нормативная база [3, 4] содержит качественные критерии оценки обращений, но не определяет механизма их количественного сопоставления для ранжирования нескольких проектов, претендующих на ограниченный инфраструктурный ресурс. При этом процедура выбора между конкурирующими проектами в условиях дефицита пропускной способности остается слабо формализованной, что приводит к рискам субъективизма и снижает эффективность использования инфраструктуры [5].

Современные тенденции цифровой трансформации транспорта предполагают широкое внедрение систем поддержки принятия решений, базирующихся на формализованных моделях и алгоритмах [6]. Одним из перспективных направлений является использование методов машинного обучения для прогнозирования успешности реализации проектов на основе ретроспективных данных [7]. Такой подход позволяет не только ранжировать проекты по интегральным показателям, но и оценивать вероятности достижения заявленных параметров, что особенно важно для снижения инвестиционных рисков.

**Целью исследования** является разработка и экспериментальное обоснование метода прогнозирования успешности реализации проектов присоединения ЖДППП с использованием ансамблевых методов машинного обучения.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие **задачи**:

- 1 Сформировать признаковое пространство для прогнозирования успешности на основе многокритериальных показателей проектов.
- 2 Построить и сравнить модели прогнозирования с использованием логистической регрессии, случайного леса и градиентного бустинга (XGBoost).
- 3 Выполнить интерпретацию результатов с использованием SHAP-анализа для выявления ключевых факторов успешности.
- 4 Оценить точность прогнозирования и практическую применимость разработанных моделей.

**1 Формализованная система показателей проектов**

В основе предлагаемого подхода лежит двухуровневая иерархическая система критериев, синтезированная на основе анализа корпоративных регламентов ОАО «РЖД» [3, 4] и принципов недискриминационного доступа [5]. Система включает пять агрегированных критериев (К1–К5), каждый из которых детализирован набором измеримых показателей. Для каждого *i*-го проекта значения показателей после нормировки к шкале [0,1] образуют вектор признаков  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM})$ , где  $M = 17$  – общее количество показателей. Перечень показателей и их влияние на успешность проекта представлен в табл. 1.

Таблица 1

**Показатели, используемые для прогнозирования успешности**

<b>Критерий</b>	<b>Код</b>	<b>Показатель</b>	<b>Тип</b>	<b>Источник</b>
К1	P1.1	Приоритетность планируемых грузов	качественный	эксперты
К1	P1.2	Соответствие стратегическим документам	качественный	эксперты
К1	P1.3	Социально-экономический эффект	качественный	эксперты
К2	P2.1	Прогнозная доходность для ОАО «РЖД»	количественный	АС «ПроГРУЗ».ТУ
К2	P2.2	Бюджетная эффективность	количественный	расчёт
К2	P2.3	Финансовая состоятельность заявителя	качественный	эксперты
К2	P2.4	Механизмы обеспечения обязательств	качественный	эксперты
К3	P3.1	Влияние на пропускную способность	количественный	ИСУЖТ ТС
К3	P3.2	Отсутствие текущих ограничений	количественный	АС Паспорт НПС
К3	P3.3	Потребность в инвестициях ОАО «РЖД»	количественный	расчёт
К3	P3.4	Готовность заявителя к софинансированию	качественный	эксперты
К4	P4.1	Готовность к корректировке параметров	качественный	эксперты
К4	P4.2	Готовность к альтернативным маршрутам	качественный	эксперты

Окончание табл. 1

Критерий	Код	Показатель	Тип	Источник
К4	P4.3	Возможность сдвоенных операций	качественный	эксперты
К5	P5.1	Стадия проектной готовности	качественный	эксперты
К5	P5.2	Комплексе разрешительной документации	качественный	эксперты
К5	P5.3	Юридическая чистота	качественный	ЕГРЮЛ

Для количественных показателей нормировка выполняется линейным преобразованием относительно максимального значения в выборке. Для качественных показателей лингвистические оценки переводятся в числовые по пятибалльной вербально-числовой шкале.

## 2 Постановка задачи прогнозирования целесообразности

Пусть имеется обучающая выборка из  $N$  проектов, для которых известны:

- вектор признаков  $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{iM})$  – значения показателей;
- целевая переменная  $y_i \in \{0, 1\}$ , характеризующая успешность реализации проекта.

Целевая переменная определяется на основе фактических данных об объёме перевозок за первые 12 месяцев эксплуатации. Проект считается успешным ( $y = 1$ ), если фактический среднегодовой объём перевозок  $V_{\text{факт}}$  составил не менее 80 % от заявленного в обращении  $V_{\text{план}}$ :

$y = 1$ , если  $V_{\text{факт}} / V_{\text{план}} \geq 0,8$ ;

$y = 0$ , иначе.

Задача прогнозирования заключается в построении модели  $f$ , которая для нового проекта оценивает вероятность его успешной реализации:  $\hat{y} = f(x)$ .

В качестве базовых алгоритмов рассматриваются:

- логистическая регрессия – линейная модель, обеспечивающая интерпретируемость;
- случайный лес (Random Forest) – ансамбль деревьев решений, устойчивый к переобучению;
- градиентный бустинг (XGBoost) [8] – ансамблевый метод последовательного улучшения модели, показывающий высокие результаты на структурированных данных.

Для оценки качества моделей используются метрики accuracy, precision, recall, F1-score, а также площадь под ROC-кривой (AUC-ROC).

## 3 Экспериментальное исследование

### 3.1 Данные

Для эксперимента использованы ретроспективные данные по 42 проектам присоединения ЖДПНП, реализованным в 2020–2024 гг. на полигонах сети железных дорог. Для каждого проекта собраны значения 17 показателей, а также фактические объёмы перевозок за первые 12 месяцев эксплуатации.

Распределение проектов по признаку успешности: 28 успешных (66,7 %), 14 неуспешных (33,3 %). Выборка разбита на обучающую (32 проекта) и тестовую (10 проектов) с сохранением пропорции классов, что гарантирует репрезентативность и реальное распределение классов.

### 3.2 Подготовка признаков

Для качественных и количественных показателей выполнено нормирование значений и приведение их к шкале от 0 до 1. Проверка мультиколлинеарности показала, что коэффициенты корреляции между признаками не превышают 0,7, что позволяет использовать все 17 показателей без исключения.

### 3.3 Результаты обучения моделей

Для каждого алгоритма выполнена оптимизация гиперпараметров с использованием кросс-валидации (5 фолдов). Для логистической регрессии подбирался параметр регуляризации  $C$ , для случайного леса – количество деревьев и максимальная глубина, для XGBoost – скорость обучения, максимальная глубина и количество деревьев. Выбирался набор, обеспечивающий максимальное среднее значение F1-меры на валидационных фолдах.

После определения оптимальных гиперпараметров каждая модель была обучена на всей обучающей выборке (32 проекта) и выполнена оценка на тестовой выборке (10 проектов). Для каждого тестового проекта модель выдавала вероятность принадлежности к классу «успешный», затем по порогу 0,5 принималось окончательное решение о классе. На основе сопоставления предсказанных классов с истинными метками (успешный – 1, неуспешный – 0) для каждой модели были рассчитаны стандартные метрики качества: accuracy (доля правильных ответов), precision (точность), recall (полнота), F1-score (гармоническое среднее precision и recall) и AUC-ROC (площадь под ROC-кривой). Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение качества моделей прогнозирования

Модель	Accuracy	Precision	Recall	F1-score	AUC-ROC
Логистическая регрессия	0,70	0,72	0,68	0,70	0,73
Случайный лес	0,76	0,78	0,73	0,75	0,79
XGBoost	0,82	0,84	0,79	0,81	0,86

Наилучшие показатели достигнуты с использованием XGBoost. F1-мера составила 0,81, AUC-ROC – 0,86, что свидетельствует о высокой разделяющей способности модели.

### 3.4 Анализ важности признаков с использованием SHAP

Для интерпретации результатов модели XGBoost применён метод SHAP (SHapley Additive exPlanations) [9], основанный на теории игр. В работе использован алгоритм TreeExplainer, оптимизированный для ансамблевых моделей на основе деревьев решений. Для каждого проекта из тестовой выборки (10 проектов) вычислялись SHAP-значения, показывающие вклад каждого из 17 признаков в отклонение прогноза модели от среднего предсказания по всей выборке.

Глобальная важность признаков определялась как среднее абсолютное SHAP-значение по всем анализируемым проектам. Чем выше это значение, тем сильнее признак в среднем влияет на итоговый прогноз. Полученные средние абсолютные SHAP-значения для пяти наиболее значимых показателей:

- прогнозная доходность для ОАО «РЖД» (P2.1) – 0,24;
- финансовая состоятельность заявителя (P2.3) – 0,19;
- приоритетность планируемых грузов (P1.1) – 0,16;
- прогнозируемое воздействие на пропускную способность (P3.1) – 0,12;
- соответствие стратегическим документам (P1.2) – 0,09.

Значение 0,24 для P2.1 показывает, что в среднем этот показатель изменяет прогнозную вероятность успеха на 0,24 (по шкале от 0 до 1) относительно среднего предсказания по выборке, увеличивая вероятность успеха. Полученные результаты подтверждают, что экономические факторы играют ключевую роль в успешности проектов. Показатели технической готовности (P5.1, P5.2) имеют средние абсолютные SHAP-значения менее 0,05, что свидетельствует об их меньшей прогностической значимости в рамках данной выборки.

### 4 Обсуждение результатов

Разработанный метод прогнозирования целесообразности обладает следующими преимуществами:

**1 Повышение объективности отбора.** Использование моделей машинного обучения позволяет количественно оценивать риски нереализации заявленных объёмов перевозок, что дополняет многокритериальную оценку проектов и снижает долю неэффективных инвестиций.

2 **Интерпретируемость результатов.** Применение SHAP-анализа обеспечивает возможность объяснения прогноза для лица, принимающего решение, что соответствует требованиям ГОСТ Р 59276-2020 [10] к системам искусственного интеллекта. Для каждого проекта может быть сформирован отчёт о ключевых факторах, повлиявших на прогноз.

3 **Адаптивность.** Модели могут переобучаться по мере накопления новых данных о реализованных проектах, что позволяет учитывать изменение внешних условий и стратегических приоритетов.

4 **Интеграция в существующий цифровой контур.** Предложенный метод может быть реализован в виде программного модуля, интегрируемого в АС ЕТП НП.ТУ [11] и использующего данные из систем АС ЭТРАН НП, АС «ПроГРУЗ». ТУ и ИСУЖТ ТС [12]. Источником признаков пространства выступают данные, уже частично собираемые в рамках рассмотрения обращений о примыкании. Модуль прогнозирования может быть реализован как расширение подсистемы АС ЕТП НП.ТУ [11], используя её базу данных для хранения как исходных признаков, так и результатов прогноза. Таким образом, интеграция не требует создания новых автономных систем, а осуществляется путём доработки существующих компонентов, что снижает затраты и риски внедрения.

Ограничения метода связаны с необходимостью накопления достаточной ретроспективной выборки (не менее 30–50 проектов) для устойчивого обучения. На начальном этапе эксплуатации системы прогнозы могут быть менее точными, однако по мере накопления данных качество модели будет повышаться.

Практическая значимость разработанного подхода подтверждается результатами эксперимента: применение модели XGBoost позволило правильно классифицировать 8 из 10 проектов в тестовой выборке. Ошибки прогноза были связаны с проектами, имеющими уникальные характеристики, не представленные в обучающей выборке, что указывает на необходимость расширения базы данных.

### **Заключение**

В работе предложен метод прогнозирования целесообразности реализации проектов присоединения железнодорожных путей необщего пользования с использованием ансамблевых методов машинного обучения. Основные результаты:

1 Сформировано признаковое пространство на основе 17 многокритериальных показателей, используемых при рассмотрении обращений о примыкании.

2 Проведено сравнение трёх моделей машинного обучения (логистическая регрессия, случайный лес, XGBoost). Наилучшие результаты достигнуты с использованием XGBoost: accuracy – 0,82, F1-score – 0,81, AUC-ROC – 0,86.

3 С помощью SHAP-анализа выявлены ключевые факторы, определяющие успешность проектов: прогнозная доходность, финансовая состоятельность заявителя, приоритетность грузов. Показано, что экономические факторы вносят наибольший вклад в прогноз.

4 Обоснована возможность интеграции разработанного метода в существующий цифровой контур ОАО «РЖД» для повышения объективности отбора проектов и снижения инвестиционных рисков.

### **Список литературы**

1 **Фонсека, М. О.** Проблемы взаимодействия с владельцами путей необщего пользования после ввода в эксплуатацию вновь построенных или реконструированных путей / М. О. Фонсека, В. Е. Нутович // *Цифровая трансформация транспорта : проблемы и перспективы : материалы IV Международной научно-практической конференции (Москва, 25 сентября 2024 г.)*. – Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. – С. 127–130.

2 ВЦИОМ. Оценка качества услуг грузовых железнодорожных перевозок : отчет по результатам опроса пользователей. – Москва, ноябрь 2023. – 89 с.

3 Об утверждении Правил рассмотрения обращений юридических лиц или индивидуальных предпринимателей, владеющих на праве собственности или на ином праве железнодорожными путями необщего пользования, о примыкании строящихся,

### **References**

1 **Fonseca, M. O.** Problems of interaction with owners of non-public railway tracks after commissioning of newly built or reconstructed tracks / M. O. Fonseca, V. E. Nutovich // *Digital transformation of transport : challenges and prospects : proceedings of the IV International scientific and practical conference (Moscow, September 25, 2024)*. – Moscow : Russian University of Transport (MIIT), 2024. – P. 127–130.

2 VCIOM. Assessment of the quality of freight railway transport services : report on the results of a user survey. – Moscow, November 2023. – 89 p.

3 On approval of the Rules for consideration of applications of legal entities or individual entrepreneurs owning on the right of ownership or other right of non-public railway tracks, on the connection of non-public railway tracks under construction, reconstruction, or restoration to

реконструируемых, восстановленных железнодорожных путей необщего пользования к инфраструктуре ОАО «РЖД» или о развитии существующих примыканий : распоряжение ОАО «РЖД» от 03.10.2022 № 2542/р. – Москва, 2022. – 88 с.

4 О внесении изменений в распоряжение ОАО «РЖД» от 3 октября 2022 г. № 2542/р : распоряжение ОАО «РЖД» от 01.08.2023 № 1929/р. – Москва, 2023.

5 Об утверждении Правил недискриминационного доступа перевозчиков к инфраструктуре железнодорожного транспорта общего пользования, грузоотправителей к услуге по перевозке грузов железнодорожным транспортом общего пользования : постановление Правительства РФ от 25.11.2003 № 710 (ред. от 27.05.2024). – Москва, 2003. – Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

6 **Ларченко, Д. В.** Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в управлении транспортными процессами / Д. В. Ларченко, Л. А. Федоров. – Москва : ИНФРА-М, 2019. – 198 с.

7 **Фонсека, М. О.** Автоматизация согласования условий примыкания новых железнодорожных путей необщего пользования к железнодорожным путям общего пользования / М. О. Фонсека, В. Е. Нутович // Цифровая трансформация транспорта : проблемы и перспективы : материалы III Международной научно-практической конференции (Москва, 2023 г.). – Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2023. – С. 10–13.

8 **Рассел, С.** Искусственный интеллект : современный подход / С. Рассел, П. Норвиг ; пер. с англ. – 4-е изд. – Москва : Вильямс, 2021. – 1416 с. (Глава 19 : «Обучение на основе ансамблей»).

9 **Молнар, К.** Интерпретируемое машинное обучение : руководство по созданию объяснимых моделей / К. Молнар ; пер. с англ. – Москва : ДМК Пресс, 2022. – 382 с. (Глава о SHAP).

10 **ГОСТ Р 59276-2020.** Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения. – Москва : Стандартиформ, 2021. – 16 с.

11 Описание функциональных возможностей Автоматизированной системы единого технологического процесса нового поколения. Модуль технические условия (АС ЕТП НП.ТУ) : внутренний регламентирующий документ ОАО «РЖД». – Москва, 2023.

12 Система комплексного моделирования работы станций и участков / А. М. Замышляев, С. В. Калинин, Д. Ю. Халевин [и др.] // Труды Акционерного общества «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте». – 2021. – Вып. 11, Т. 1. – С. 90–98.

the infrastructure of JSC «Russian Railways» or on the development of existing connections : Order of JSC «Russian Railways» No. 2542/r dated 03.10.2022. – Moscow, 2022. – 88 p.

4 On introducing amendments to Order of JSC «Russian Railways» No. 2542/r dated October 3, 2022 : Order of JSC «Russian Railways» No. 1929/r dated 01.08.2023. – Moscow, 2023.

5 On approval of the Rules for non-discriminatory access of carriers to the infrastructure of public railway transport, consignors to the service of freight transportation by public railway transport : Decree of the Government of the Russian Federation No. 710 dated 25.11.2003 (as amended on 27.05.2024). – Moscow, 2003. – Access from the legal reference system «ConsultantPlus».

6 **Larchenko, D. V.** Intelligent decision support systems in transport process management / D. V. Larchenko, L. A. Fedorov. – Moscow : INFRA-M, 2019. – 198 p.

7 **Fonseca, M. O.** Automation of coordination of conditions for connection of new non-public railway tracks to public railway tracks / M. O. Fonseca, V. E. Nutovich // Digital transformation of transport : challenges and prospects : proceedings of the III International scientific and practical conference (Moscow, 2023). – Moscow : Russian University of Transport (MIIT), 2023. – P. 10–13.

8 **Russell, S.** Artificial Intelligence : a modern approach / S. Russell, P. Norvig ; trans. from English. – 4th ed. – Moscow : Williams, 2021. – 1416 p. (Chapter 19: “Ensemble-Based Learning”).

9 **Molnar, K.** Interpretable machine learning : a guide for making black box explainable models / K. Molnar ; trans. from English. – Moscow : DMK Press, 2022. – 382 p. (Chapter on SHAP).

10 **GOST R 59276-2020.** Artificial intelligence systems. Methods for ensuring trust. General provisions. – Moscow : Standartinform, 2021. – 16 p.

11 Description of the functional capabilities of the Automated System of the new generation unified technological process. Technical conditions module (AS ETP NP.TU) : internal regulatory document of JSC “Russian Railways”. – Moscow, 2023.

12 System for integrated modeling of station and section operation / A. M. Zamyshlyayev, S. V. Kalinin, D. Yu. Khalevin [et al.] // Proceedings of JSC «Research and Design Institute for Information Technology, Automation and Communication in Railway Transport». – 2021. – Issue 11, Vol. 1. – P. 90–98.

*M. O. Fonseca*

**PREDICTING THE VIABILITY OF NON-PUBLIC RAILWAY  
TRACK CONNECTION PROJECTS USING ENSEMBLE MACHINE  
LEARNING METHODS**

**Abstract.** The paper addresses the scientific and practical problem of increasing the objectivity of selecting projects for connecting non-public railway tracks to public infrastructure. A method for predicting the viability of project implementation based on ensemble machine learning methods is proposed. The scientific novelty lies in the development and experimental validation of predictive models using multi-criteria project indicators as feature space, as well as in the application of SHAP analysis for result interpretation. The practical significance of the work is the creation of algorithmic support that reduces the share of inefficient investments through preliminary assessment of risks of failing to achieve declared traffic volumes.

**Keywords:** process automation, non-public railway tracks, prediction, machine learning, XGBoost, SHAP analysis.

**For citation:** Fonseca, M. O. Predicting the viability of non-public railway track connection projects using ensemble machine learning methods / M. O. Fonseca // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 59–65. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_59.

**Сведения об авторах**

**Фонсека Марина Олеговна**

Российский университет транспорта  
(РУТ МИИТ),  
кафедра «Цифровые технологии  
управления транспортными процессами»,  
аспирант,

Центр фирменного транспортного  
обслуживания – ОАО «РЖД»,  
начальник отдела автоматизации  
и внедрения информационных систем,  
e-mail: MarinaFonseka@yandex.ru

**Information about the authors**

**Fonseca Marina Olegovna**

Russian University of Transport (RUT MIIT),  
Chair "Digital Technologies  
for Transport Process Management",  
Postgraduate Student,

Corporate Transport Service Center – JSC "Russian  
Railways",  
Head of the Department for Automation  
and Implementation of Information Systems,  
e-mail: MarinaFonseka@yandex.ru

## ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

УДК 629.463.62

DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_66

*Д. Г. Бейн, Л. В. Цыганская***ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДВУХСЕКЦИОННОГО СЪЕМНОГО КУЗОВА  
ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ  
НА ДЛИННОБАЗНЫХ ВАГОНАХ-ПЛАТФОРМАХ**

**Аннотация.** Рассмотрены способы перевозки автомобилей в стандартных крупнотоннажных контейнерах с размерами по ГОСТ Р 53350, описаны недостатки указанных способов. Приведена математическая постановка задачи по определению максимальных размеров съемного кузова, совместимого с фитинговым вагоном-платформой. Приведен пример расчета размеров поперечного сечения указанного съемного кузова. Определены предварительные технико-экономические параметры двухсекционного съемного кузова, состоящего из двух отдельных секций. В случае его применения увеличивается количество перевозимых легковых автомобилей на 25 % по сравнению с перевозками автомобилей в стандартных контейнерах для генеральных грузов типоразмера 1АА (1ААА) по ГОСТ Р 53350, при этом снижается трудоемкость работ по установке и креплению автомобилей. Выполнена ориентировочная оценка стоимости расходов при железнодорожной транспортировке легковых автомобилей в рассмотренном двухсекционном съемном кузове. Предложенные технические решения могут быть применены для перевозки легковых автомобилей на длиннобазных фитинговых вагонах-платформах.

**Ключевые слова:** контейнерный поезд, вагон-платформа, съемный кузов, крупнотоннажный контейнер, вагон-автомобилевоз.

**Для цитирования:** Бейн, Д. Г. Обоснование конструкции двухсекционного съемного кузова для перевозки легковых автомобилей на длиннобазных вагонах-платформах / Д. Г. Бейн, Л. В. Цыганская // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 66–81. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_66.

**Введение**

Перевозка легковых автомобилей по железным дорогам осуществляется в вагонах-автомобилевозах и в крупнотоннажных контейнерах, устанавливаемых на фитинговые вагоны-платформы.

По данным информационного агентства РЖД.ПАРТНЕР.РУ, погрузка автомобилей на железнодорожной сети превысила 439,5 тыс. т в 2024 году [1] (суммарно в вагонах-автомобилевозах и в крупнотоннажных контейнерах).

По данным дайджеста «Контейнеры» за апрель 2025 г. [2], «прочие грузы» занимают в структуре перевозок контейнеров почти половину объема (48 %, или 3,8 млн ДФЭ). Преобладающая часть – 84 % – грузы 3-го тарифного класса, к которым также относятся автомобили и сельскохозяйственные машины, которые заняли в структуре перевозок 0,52 млн ДФЭ. Ежегодный рост импорта автомобилей является одним из основных факторов дальнейшего увеличения объемов перевозок контейнеров в данной номенклатурной позиции [2].

При контейнерных перевозках легковых автомобилей на фитинговых вагонах-платформах используют стандартные и специализированные крупнотоннажные контейнеры длиной 40 футов (типоразмеры 1АА (1ААА) по ГОСТ 53350–2009 [3]). В каждом контейнере размещают четыре легковых автомобиля (в два яруса), при этом используют дополнительные средства крепления – ремни, стропы, металлические рамы и т.п. Специализированный контейнер для перевозки автомобилей, выполненный в габаритах стандартного крупнотоннажного контейнера типоразмера 1АА (1ААА) по ГОСТ Р 53350, но содержащий двери с обеих торцевых сторон, позволяет осуществлять сквозной проезд автомобилей для загрузки поезда с торцевой погрузочной площадки (рампы, аппарели, эстакады).

Перевозка автомобилей в стандартных и специализированных контейнерах имеет ряд недостатков: – внутренняя ширина (до 2352 мм) и внутренняя высота (до 2698 мм) контейнера ограничивают размеры перевозимых автомобилей, а соответственно модельный ряд автомобилей (номенклатуру перевозимых автомобилей) и их количество (до четырех единиц);

– высокая трудоемкость работ по размещению и закреплению автомобилей из-за тесного пространства между автомобилем и стенками контейнера, при этом требуется использовать множество дополнительных средств крепления, таких как грузовые цепи, тросы, стропы или специальные металлические конструкции, вследствие чего, по мнению участников рынка [1], при перевозке в контейнерах нельзя гарантировать сохранность внешнего вида автомобилей;

– необходимость использования оборудования для подъема и установки груженого контейнера на фитинговый вагон-платформу, так как заезд автомобилей осуществляется своим ходом в снятый с вагона-платформы контейнер, затем груженный контейнер устанавливается на вагон-платформу.

Вагоны-автомобилевозы не имеют указанных недостатков, но поскольку в настоящее время наблюдается дефицит таких вагонов [1], одним из актуальных направлений развития железнодорожной транспортировки легковых автомобилей является создание съемного кузова с улучшенными техническими характеристиками по сравнению с контейнерами, имеющими стандартные размеры.

В работах [4–8] показана эффективность применения съемных кузовов в различных направлениях железнодорожных перевозок. В работе [7] отмечено, что съемный кузов обладает невысокой себестоимостью, при этом использование съемных кузовов обеспечивает сокращение расходов на приобретение и содержание подвижного состава. При этом, как отмечено в работе [9], съемные кузова находятся на начальной стадии своего внедрения, вследствие чего хорошие расчетные технико-экономические характеристики не позволяют им пока занять значимую позицию на внутреннем и внешнем рынках.

### ***Цель работы***

Цель настоящей работы – разработка концепта (выбор технических решений) съемного кузова для перевозки легковых автомобилей на фитинговых вагонах-платформах с максимальным использованием размеров основного габарита погрузки [10], обладающего следующими преимуществами по сравнению со стандартными контейнерами:

- увеличение количества перевозимых легковых автомобилей;
- расширение модельного ряда перевозимых легковых автомобилей;
- сокращение трудоемкости работ по размещению и креплению легковых автомобилей.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

определение максимальных габаритных размеров поперечного сечения съемного кузова исходя из условия вписывания в основной габарит погрузки, размеры которого установлены «Техническими условиями» [10];

- выбор технических решений, позволяющих снизить трудоемкость работ по размещению и креплению легковых автомобилей, а также увеличить количество перевозимых легковых автомобилей;
- сравнительная оценка стоимости перевозок легковых автомобилей в съемном кузове и стандартном контейнере.

### ***Математическая постановка задачи по определению максимальных габаритных размеров поперечного сечения съемного кузова***

В работе [9] применительно к съемным кузовам грузовых вагонов отмечено следующее:

- рост полезного объема возможен при увеличении длины кузова и допустимой высоты погрузки, поскольку сама высота кузова ограничивается габаритом подвижного состава;
- при рассмотрении съемных кузовов необходимо учитывать длину и тип «носителя» – фитинговых вагонов-платформ различных моделей.

Применительно к съемным кузовам, перевозимым на фитинговых вагонах-платформах как груз (когда съемный кузов не является частью вагона), высота съемного кузова ограничена погрузочной высотой вагона-платформы и размерами габарита погрузки, установленными «Техническими условиями» [10]).

Площадь поперечного сечения габарита погрузки  $A_{гп}$  является постоянной:

$$A_{гп} = \text{const.} \quad (1)$$

При разработке схемы размещения груза можно выделить площадь сечения, занимаемую вагоном  $A_{в}$ , площадь сечения, занимаемую грузом  $A_{гр}$ , и неиспользуемую площадь  $A_{нп}$  (рис. 1), тогда

$$A_{гр} + A_{в} + A_{нп} = A_{гп}, \quad (2)$$

где  $A_{гр}$  – площадь поперечного сечения, занимаемая грузом (например, съемным кузовом);  $A_B$  – площадь поперечного сечения, занимаемая вагоном конкретной модели;  $A_{нп}$  – неиспользуемая площадь поперечного сечения габарита погрузки.

Неиспользуемую площадь поперечного сечения  $A_{нп}$  можно определить как

$$A_{нп} = A_{го} + A_{см}, \quad (3)$$

где  $A_{го}$  – площадь геометрических ограничений (неиспользуемая площадь поперечного сечения габарита, в которой груз геометрически не может быть расположен, например, площадь между боковыми балками рамы вагона и очертанием габарита погрузки);  $A_{см}$  – площадь конструктивных ограничений (неиспользуемая площадь поперечного сечения габарита из-за ограничений, обусловленных возможным смещением груза относительно опорной поверхности вагона в поперечном направлении).

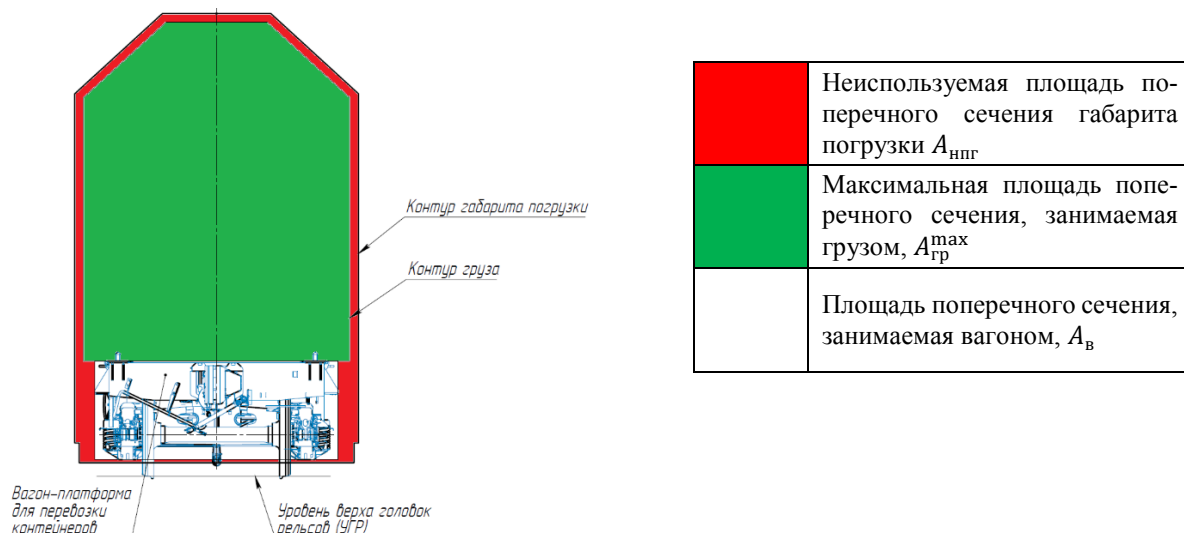


Рис. 1. Использование площади габарита погрузки

Условие, при котором для груза используется наибольшая площадь  $A_{гр}^{max}$  (наибольшая возможная для груза часть площади поперечного сечения габарита погрузки), можно описать условием

$$A_{гр}^{max} = A_{гп} - A_B - A_{нп}^{min}. \quad (4)$$

Также площадь поперечного сечения груза можно описать определенным интегралом

$$A_{гр} = \int_{A_{igr}}^{A_{гр}^{max}} dA_{igr}, \quad (5)$$

где  $A_{igr}$  – элемент площади поперечного сечения груза.

В этом случае должны выполняться условия вписывания груза в очертание габарита погрузки. Поскольку площадь поперечного сечения груза  $A_{гр}$  также определяется его шириной и высотой,

$$A_{гр} = \iint_{A_{igr}}^{A_{гр}^{max}} f(B_{гр}^i, H_{гр}^i) dB_{гр}^i dH_{гр}^i, \quad (6)$$

при этом должны выполняться условия

$$B_{гр}^i \leq B_{гп}^i, H_{гр}^i \leq H_{гп}^i,$$

тогда

$$A_{гр} = \int_{B_{гр}^i}^{B_{гп}^i} dB_{гр}^i \int_{H_{гр}^i}^{H_{гп}^i} dH_{гр}^i \rightarrow A_{гр}^{max} = A_{гп} - A_B - A_{нп}^{min}, \quad (7)$$

где  $B_{гр}^i$  – габаритная ширина груза в точке  $i$ ;  $B_{гп}^i$  – ширина габарита погрузки в точке  $i$  его очертания;  $H_{гр}^i$  – габаритная высота груза в точке  $i$ ;  $H_{гп}^i$  – высота габарита погрузки в точке  $i$  его очертания.

Для груза  $A$  (рис. 2), имеющего переменный контур нижнего очертания и верхнего очертания, формула примет вид

$$A_{гр} = \int_{B_{гр}^i}^{B_{гп}^i} (f_2(B^i) - f_1(B^i)) dB^i \rightarrow A_{гр}^{max} = A_{гп} - A_{в} - A_{нп}^{min}, \quad (8)$$

при этом

$$f_2(B^i) \geq f_1(B^i),$$

где  $f_2(B^i)$  – функция верхнего контура очертания груза; где  $f_1(B^i)$  – функция нижнего контура очертания груза.

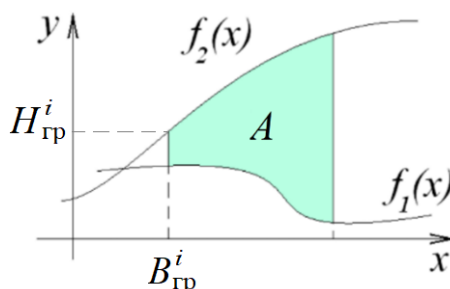


Рис. 2. Область интегрирования

Таким образом, задача по определению максимальных габаритных размеров поперечного сечения съемного кузова решается в том числе с определением конструктивных ограничений (смещений, параметров вагонов и т.п.), лимитирующих область поиска.

#### Расчет размеров съемного кузова

Рассмотрим пример определения ограничений при вписывании съемного кузова, устанавливаемого на фитинговый вагон-платформу, в основной габарит погрузки. Схема вписывания съемного кузова в очертание габарита погрузки показана на рис. 3.

При этом следует учитывать возможное смещение  $L_{пзф}$  контейнера относительно установочной поверхности фитинговых упоров вагона в поперечном направлении из-за зазоров между угловыми нижними фитингами контейнера и фитинговыми упорами вагона.

Тогда максимальную ширину съемного кузова можно определить по формуле

$$B_{ск}^{max} = B_{гп}^{max} - 2L_{пзф}, \quad (9)$$

где  $B_{ск}^{max}$  – максимально возможная ширина съемного кузова;  $B_{гп}^{max}$  – максимальная ширина габарита погрузки;  $L_{пзф}$  – максимально возможное смещение в поперечном направлении углового нижнего фитинга съемного кузова относительно фитингового упора вагона-платформы.

Соответственно ширина  $B_{ск}^i$  съемного кузова в произвольной точке очертания габарита погрузки определяется по формуле

$$B_{ск}^i = B_{гп}^i - 2L_{пзф}, \quad (10)$$

где  $B_{гп}^i$  – ширина габарита погрузки в рассматриваемой точке его очертания.

Смещение  $L_{пзф}$  можно определить по формуле

$$L_{пзф} = B_{уфк} - B_{фув}, \quad (11)$$

где  $B_{уфк}$  – ширина установочного паза нижнего углового фитинга контейнера;  $B_{фув}$  – ширина поперечного сечения рабочей части (штыря) фитингового упора вагона.

Максимальная высота съёмного кузова  $H_{СК}^{\max}$  относительно опорной поверхности фитингового упора вагона-платформы

$$H_{СК}^{\max} = H_{ГП} - H_{ВУГР} - h_{КЗВ}, \quad (12)$$

где  $H_{ГП}$  – высота габарита погрузки;  $H_{ВУГР}$  – расстояние от уровня верха головок рельсов до опорной поверхности фитингового упора вагона-платформы;  $h_{КЗВ}$  – конструктивный запас высоты для возможности установки кузова на вагоны с разным расстоянием  $H_{ВУГР}$ .

Соответственно высота  $H_{СК}^i$  съёмного кузова относительно опорной поверхности фитингового упора вагона-платформы в произвольной точке очертания габарита определяется по формуле

$$H_{СК}^i = H_{ГП}^i - H_{ВУГР}, \quad (13)$$

где  $H_{ГП}^i$  – высота габарита погрузки в рассматриваемой точке его очертания.

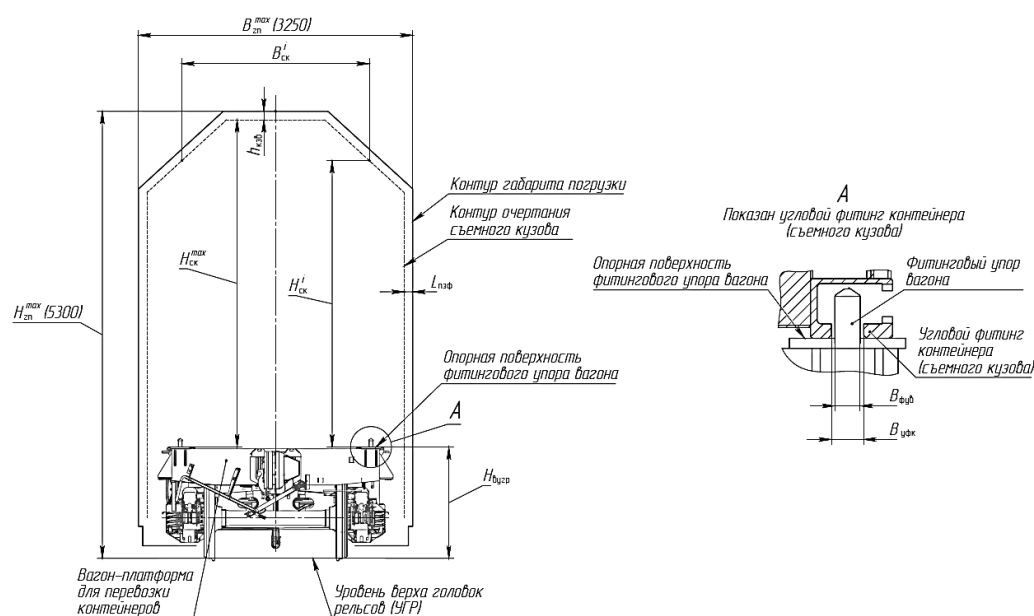


Рис. 3. Схема вписывания съёмного кузова в очертание габарита погрузки

#### Сравнение размеров съёмного кузова с размерами стандартного контейнера

Ширина габарита погрузки больше ширины стандартного контейнера на величину

$$\Delta B = B_{ГП}^{\max} - B_{КТ}^{\max}, \quad (14)$$

где  $B_{КТ}^{\max}$  – максимальная ширина стандартного контейнера.

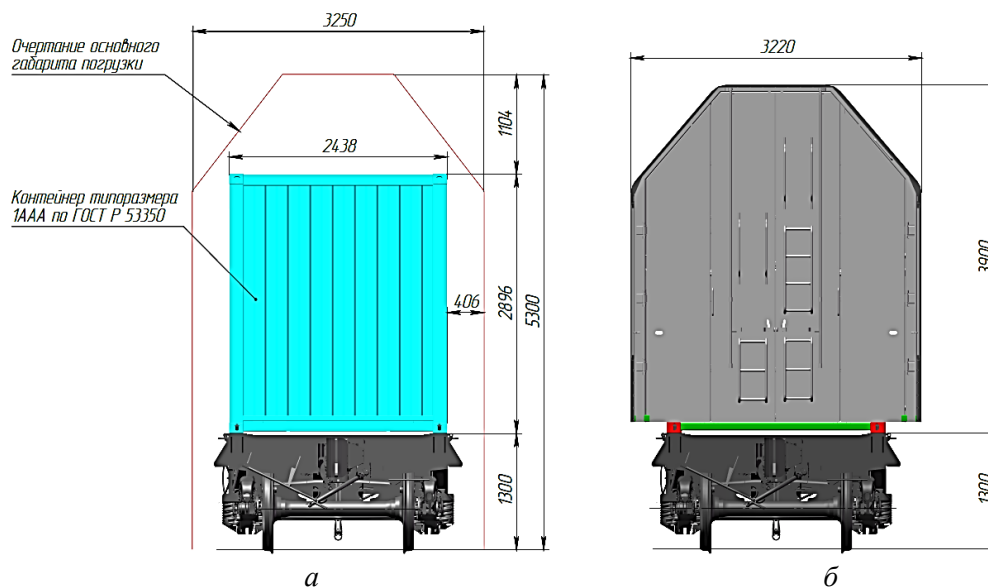
Например, для основного габарита погрузки  $B_{ГП}^{\max} = 3250$  мм.

Ширина крупнотоннажного контейнера  $B_{КТ}^{\max} = 2438$  мм.

Тогда, для основного габарита погрузки

$$\Delta B = 3250 - 2438 = 812 \text{ мм.}$$

На рис. 4 показано сравнение размеров съёмного кузова (с учетом вышерассмотренных ограничений) в основном габарите погрузки со стандартным крупнотоннажным контейнером типоразмера 1 ААА по ГОСТ Р 53350 (рассматривается установка на вагон-платформу с высотой 1300 мм от уровня верха головок рельсов до опорной поверхности фитинговых упоров).



**Рис. 4. Сравнение размеров съемного кузова и стандартного контейнера типоразмера 1AAA по ГОСТ Р 53350 на фитинговом вагоне-платформе в основном габарите погрузки:**  
*a* – стандартный контейнер типоразмера 1AAA по ГОСТ Р 53350; *б* – съемный кузов

#### Технические решения

На основе результатов расчетов и опыта перевозок известно, что длина стандартного контейнера типоразмера 40 футов позволяет разместить вдоль контейнера максимум два легковых автомобиля (для автомобилей длиной  $L_{авт} \approx 4,5$  м).

Согласно ГОСТ Р 53350, внутренняя длина контейнера  $L_{квн}$  типоразмера 40 футов

$$L_{квн} = 11998 \text{ мм} \approx 12 \text{ м.}$$

Соответственно вдоль одного контейнера можно разместить количество автомобилей

$$n_a = L_{квн} / L_{авт}, \quad (15)$$

где  $L_{авт}$  – длина автомобиля.

Для среднеразмерных легковых автомобилей с длиной  $L_{авт} = 4,5$  м получаем

$$n_a = \frac{L_{квн}}{L_{авт}} = \frac{12}{4,5} = 2 \text{ ед.} \quad (16)$$

При этом внутри контейнера остается неиспользованная внутренняя длина  $\Delta L_{квн}$ :

$$\Delta L_{квн} = L_{квн} - n_a \cdot L_{авт} = 12 - 2 \cdot 4,5 = 3 \text{ м.} \quad (17)$$

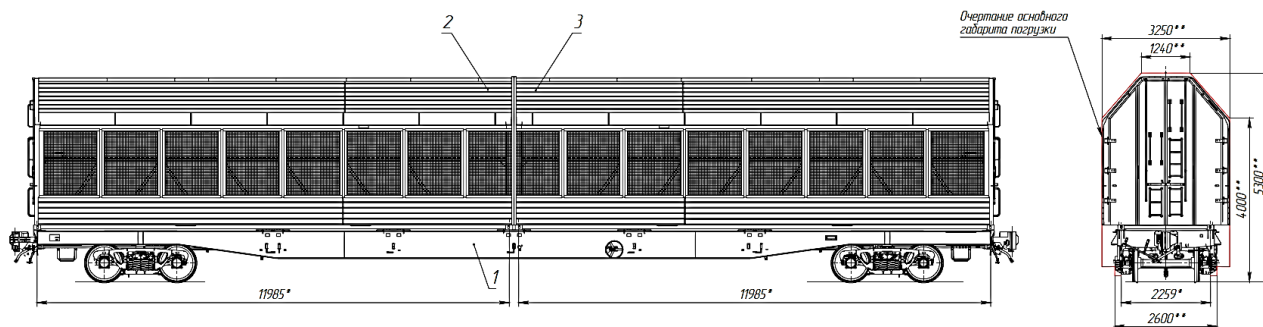
Неиспользованная внутренняя длина в двух 40-футовых контейнерах

$$2\Delta L_{квн} = 6 \text{ м} > L_{авт} = 4,5 \text{ м.}$$

Таким образом, если объединить пространство двух 40-футовых контейнеров, можно установить по длине объединенного пространства на один автомобиль больше, чем в двух отдельных контейнерах.

Чтобы задействовать длину  $\Delta L_{квн}$  для размещения автомобиля, но сохранить установочные размеры стандартного контейнера, предлагается двухсекционный съемный кузов для перевозки автомобилей на длиннобазном фитинговом вагоне-платформе, состоящий из двух отдельных секций (рис. 5).

Выбор длиннобазного вагона-платформы для таких перевозок обусловлен возможностью установки двух секций съемного кузова длиной 40 футов каждая. Установочные размеры каждой секции соответствуют стандартным установочным размерам 40-футового контейнера (см. рис. 5).



**Рис. 5. Двухсекционный съемный кузов, установленный на длиннобазном вагоне-платформе:**

1 – длиннобазный вагон-платформа; 2 и 3 – секции съемного кузова; \* расстояния между фитинговыми упорами вагона; \*\* размеры основного габарита погрузки

Две установленные на вагон секции имеют смежные внутренние объемы, так как торцевых стен или дверей между ними нет, что позволяет сформировать общее внутреннее пространство и более эффективно использовать суммарную внутреннюю длину двух секций по сравнению с разобщенными внутренними длинами двух отдельных контейнеров.

Каждая секция содержит основание с четырьмя нижними угловыми фитингами, расстояние между которыми аналогично расстоянию между нижними угловыми фитингами стандартного крупнотоннажного контейнера.

Такое решение обеспечивает:

- возможность установки каждой секции типовыми грузоподъемными средствами контейнерных терминалов;

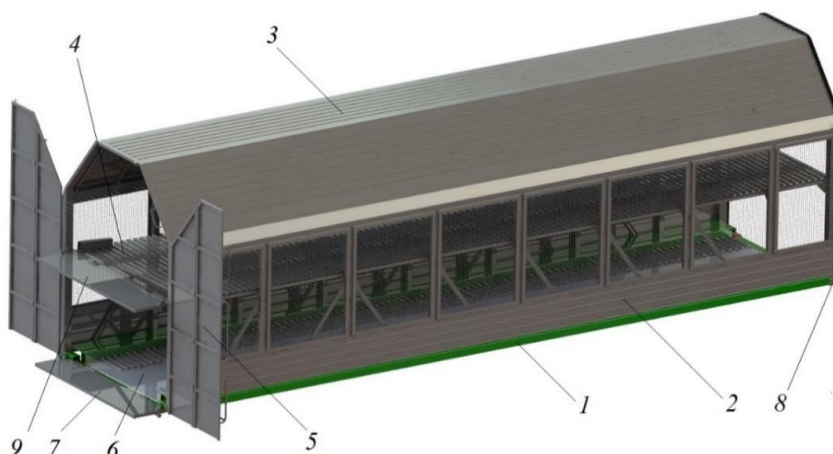
- совместимость секции с фитинговым вагоном-платформой.

Таким образом, на длиннобазном вагоне-платформе устанавливаются две секции, формирующие съемный кузов.

Каждая секция включает в себя (рис. 6): кузов с основанием 1, боковыми стенами 2 и крышей 3; верхний ярус 4; торцевые двери 5 (с одной стороны кузова).

Основание содержит необходимый набор несущих балок, настил 6 для размещения автомобилей, откидные переездные площадки 7 для заезда/выезда автомобилей и стандартные нижние угловые фитинги 8 контейнера для установки на вагон-платформу.

Верхний ярус 4 выполнен съемным, с возможностью регулировки по высоте, и также содержит настил для размещения автомобилей и откидные переездные площадки 9.



**Рис. 6. Общий вид одной секции съемного кузова:**

1 – основание; 2 – боковая стена; 3 – крыша; 4 – верхний ярус; 5 – торцевая дверь; 6 – настил; 7 – откидные переездные площадки нижнего яруса; 8 – стандартные нижние угловые фитинги; 9 – откидные переездные площадки верхнего яруса

Предлагаемое решение работает следующим образом. Двухсекционный съемный кузов устанавливается в порожнем состоянии нижними угловыми фитингами на фитинговые упоры длиннобазного вагона-платформы (рис. 7). Погрузка автомобилей в съемный кузов осуществляется с погрузочной эстакады (рамы, пандуса) через торцевые двери одной из секций. При этом между секциями образуется сквозной проем с возможностью установки автомобилей вдоль секций по всей внутренней длине съемного кузова, в том числе и в проеме между секциями, как это показано на рис. 7, что позволяет разместить 5 автомобилей на нижнем ярусе и 5 автомобилей на верхнем ярусе, всего 10 автомобилей (с рассматриваемой длиной 4,5 м).

Типовая схема размещения автомобилей в стандартном контейнере (рис. 8) позволяет перевезти 8 автомобилей в двух контейнерах, при этом второй ярус устанавливается под наклоном с помощью ремней, цепей и других средств крепления.

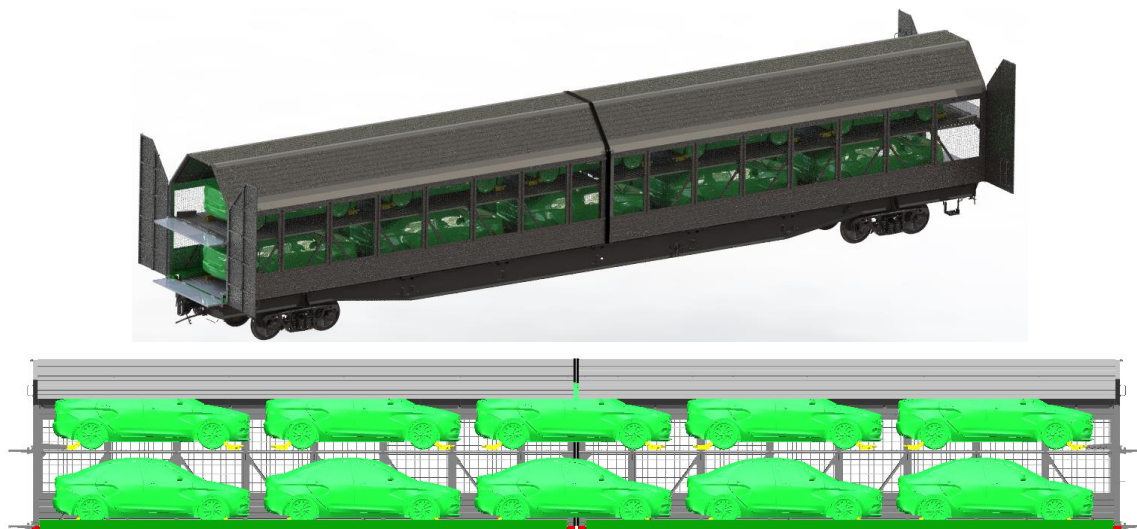


Рис. 7. Размещение легковых автомобилей длиной  $\approx 4,5$  м в двухсекционном съемном кузове

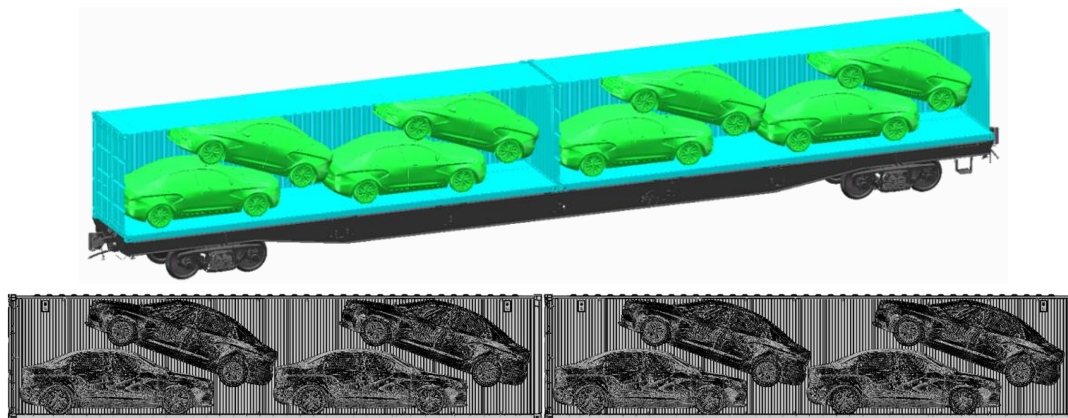
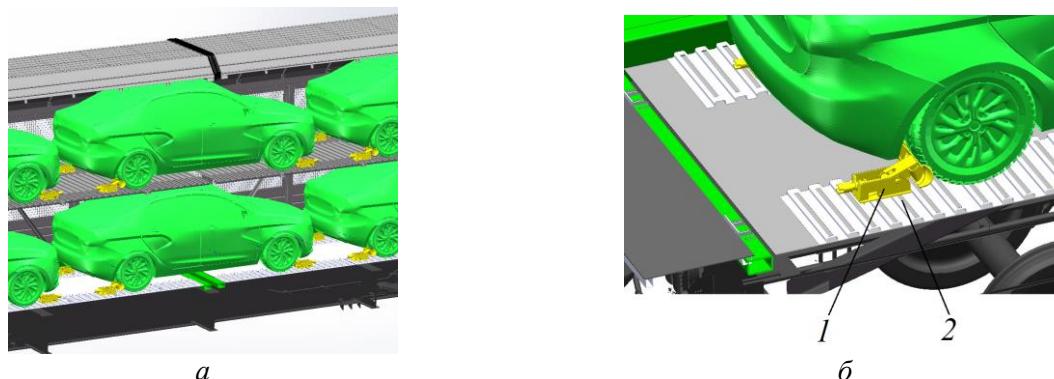


Рис. 8. Размещение легковых автомобилей длиной  $\approx 4,5$  м в двух стандартных контейнерах длиной 40 футов (реквизиты крепления автомобилей не показаны)

Так как конструкция откидных переездных площадок и торцевых дверей предлагаемого съемного кузова аналогична конструкции, применяемой в вагонах-автомобилевозах, имеется возможность сквозного проезда автомобилей из одной секции в другую секцию и сквозного проезда автомобилей через состав вагонов с такими кузовами, что делает погрузку значительно проще, чем поконтейнерная погрузка автомобилей по схеме, показанной на рис. 8.

После загрузки в съемный кузов автомобили на каждом ярусе закрепляют с помощью стандартных быстросъемных колесных упоров, применяемых во многих вагонах-автомобилевозах [10], чтобы предотвратить смещение или повреждение автомобилей во время транспортировки. Такие упоры устанавливаются в прорези, сделанные по всей длине настила пола, что позволяет закреплять автомобили с различной колесной базой (рис. 9). Применимы также упоры со штыревой фиксацией к настилу пола, например, [11], в этом случае вместо прорезей в настиле пола выполняются отверстия.

По прибытии в пункт назначения колесные упоры снимают и проводят выгрузку автомобилей. После разгрузки, при необходимости, секции съемного кузова снимаются с вагона-платформы посредством крана с использованием траверсы и строп, закрепленных к нижним угловым фитингам секции.



**Рис. 9. Закрепление легковых автомобилей в съемном кузове колесными упорами:**

*а* – между двумя секциями съемного кузова; *б* – в консольной части секции;

*1* – быстросъемные колесные упоры; *2* – прорезы в настиле пола для установки колесных упоров

За счет увеличения ширины и высоты съемного кузова по сравнению со стандартным контейнером, а также за счет возможности регулировки по высоте и снятия верхнего яруса обеспечивается возможность перевозки автомобилей увеличенных габаритов, что расширяет модельный ряд перевозимых автомобилей.

За счет увеличенных внутренних размеров, применения типовых быстросъемных колесных упоров [10] или упоров со штыревой фиксацией (например, [11]), переездных площадок и торцевых дверей существенно снижается трудоемкость работ по установке и закреплению автомобилей.

Сравнение параметров предлагаемого двухсекционного съемного кузова со стандартным крупнотоннажным контейнером типоразмера 1AAA [3] приведено в табл. 1.

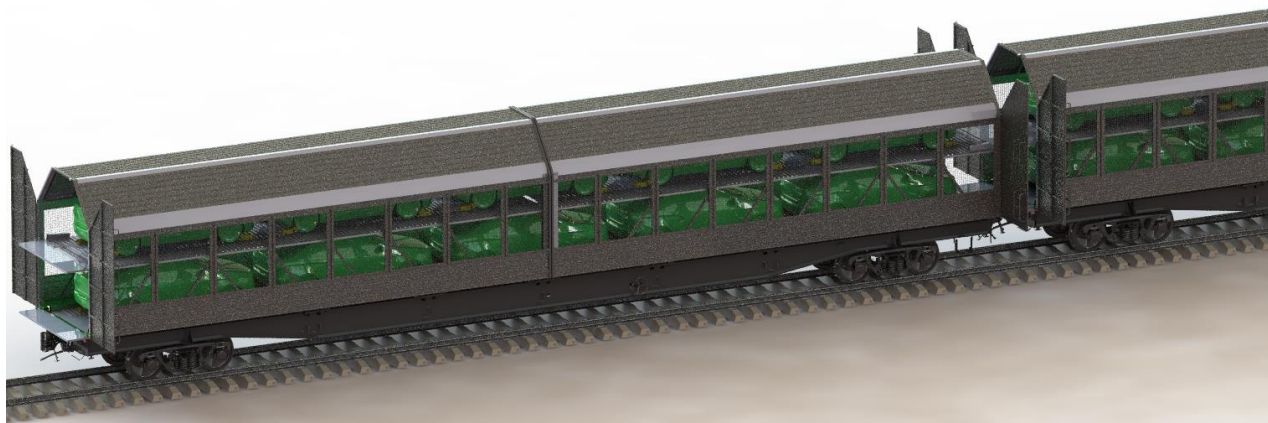
Таблица 1

**Сравнение параметров предлагаемого двухсекционного съемного кузова для перевозки легковых автомобилей со стандартным крупнотоннажным контейнером типоразмера 1AAA**

Параметр	Стандартный контейнер типоразмера 1AAA по [3]	Съемный кузов	Разница, %
Размеры одного контейнера и одной секции съемного кузова			
Габаритные размеры, мм:			
– длина	12192	12192	0
– ширина	2438	3220*	+32 %
– высота	2896	3896	+35 %
Внутренние размеры, мм:			
– длина	12017	12017	0
– ширина	2344	2850	+22 %
– высота	2663	3663	+37 %
Размещение автомобилей			
Количество автомобилей (с кузовом типа «седан» длиной 4,5 м)	8 (в двух контейнерах)	10 (в двух секциях)	+25 %
Количество автомобилей (с кузовом типа «седан» длиной 4,5 м) в составе поезда из 40 длиннобазных вагонов-платформ	320 (в 80 контейнерах)	400 (в 80 секциях)	+25 %

\* ширина определена с учетом возможных поперечных смещений съемного кузова из-за зазоров между угловыми фитингами съемного кузова и фитинговыми упорами вагона.

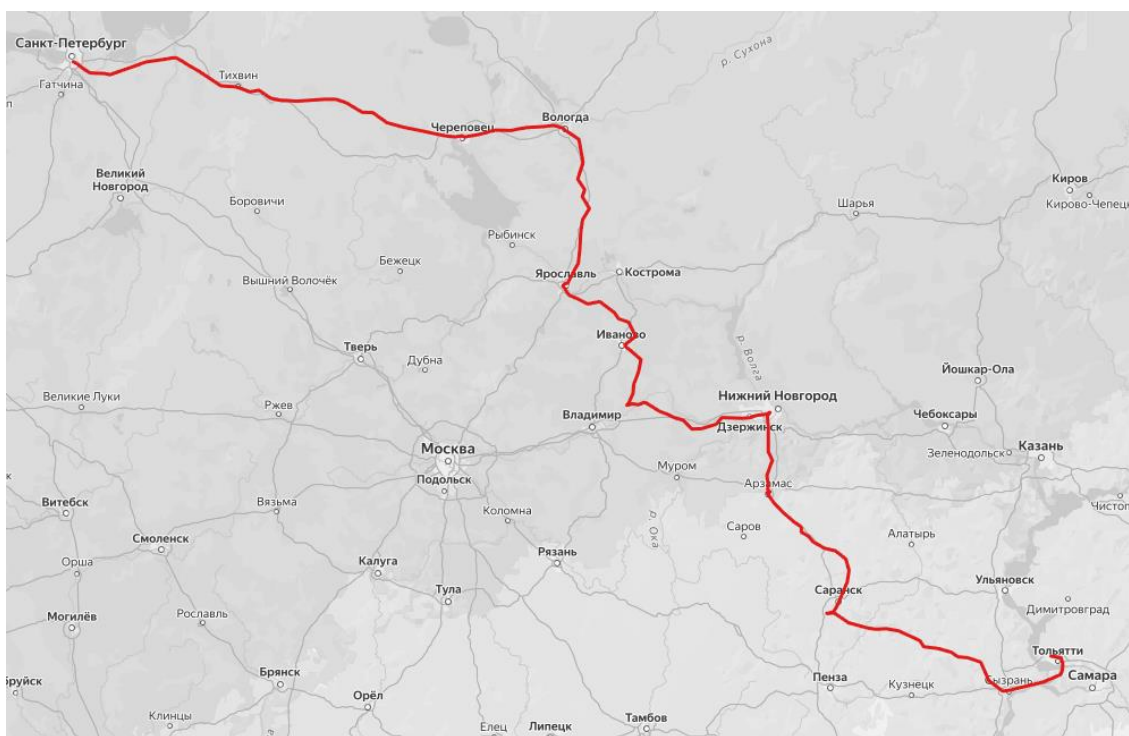
На рис. 10 показан фрагмент состава поезда с длиннобазными вагонами-платформами, на каждую из которых установлено по две секции съемного кузова, в процессе погрузки/разгрузки автомобилей.



**Рис. 10. Две длиннобазные платформы с двухсекционными съемными кузовами**

Оценка стоимости снижения расходов при транспортировке легковых автомобилей

Для сравнения стоимости расходов при транспортировке автомобилей с использованием съемных кузовов в сравнении с перевозками в контейнерах проведен расчет согласно Прейскуранту [12]. Технические характеристики вагона (тара и грузоподъемность) были выбраны идентичными на основе сведений о современных длиннобазных вагонах-платформах для перевозки крупнотоннажных контейнеров. Расчет производился в калькуляторе ОАО «РЖД» [13] для маршрута перевозки Тольяти – Санкт-Петербург (рис. 11).



**Рис. 11. Рассматриваемый маршрут железнодорожной транспортировки легковых автомобилей Тольяти – Санкт-Петербург**

Дополнительно учитывались масса стандартного контейнера и съемного кузова:

- масса порожнего контейнера типоразмера 1AAA  $\approx 4,5$  т;
- предварительная масса одной порожней секции съемного кузова  $\approx 8,0$  т (с «запасом», без учета применения высокопрочных сталей, алюминиевых сплавов и т.п.).

Рассматривалась перевозка легковых автомобилей массой 1,25 т.

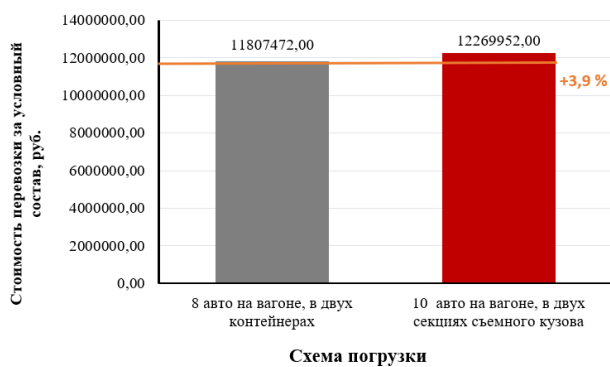
Результаты ориентировочного расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

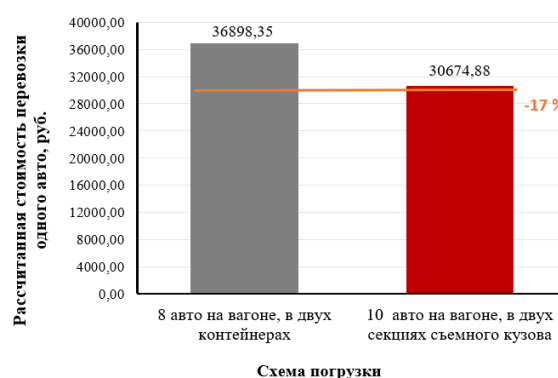
**Результаты ориентировочного расчета стоимости железнодорожной транспортировки  
легковых автомобилей в контейнерах и в съемных кузовах**

Параметры	Размещение автомобилей	
	в стандартном крупно- тоннажном контейнере типоразмера 1ААА (два контейнера на одном вагоне)	в двухсекционном съемном кузове (две секции на одном вагоне)
Количество легковых автомобилей на одном вагоне, ед.	8	10
Вес перевозимого груза (легковых автомобилей) на одном вагоне (масса контейнеров нетто), т	10,0	12,5
Вес груза брутто на одном вагоне, т	19,0	28,5
Количество вагонов в условном составе, ед.	40	40
Ориентировочная стоимость перевозки на одном вагоне, руб., с учетом [13]	295 186,80	306 748,80
Ориентировочная стоимость перевозки за условный состав, руб.	11807472,00	12269952,00
Ориентировочная стоимость перевозки одного автомобиля, руб.	36898,35	30674,88

Сравнение стоимости перевозки за условный состав рассматриваемых вагонов приведено на диаграмме (рис. 12). Сравнение стоимости перевозки одного легкового автомобиля приведено на диаграмме (рис. 13).



**Рис. 12. Стоимость перевозки за условный состав**



**Рис. 13. Рассчитанная стоимость перевозки одного авто**

Указанный расчет произведен по минимальному набору характеристик и с рядом упрощений, поэтому является приблизительным, но позволяет оценить эффективность применения съемных кузовов для перевозки легковых автомобилей в сравнении с перевозками в стандартных крупнотоннажных контейнерах с размерами по ГОСТ Р 53350 [3]. При этом в расчете не учтено сравнение затрат на погрузочно-разгрузочные работы.

Из табл. 2 и диаграммы на рис. 12 видно, что стоимость перевозки за условный состав для предложенных съемных кузовов на 4 % больше стоимости перевозки состава со стандартными контейнерами по ГОСТ Р 53350 [3], что связано с большей массой груза с учетом увеличенной массы секции съемного кузова в сравнении со стандартным контейнером.

При этом стоимость перевозки одного автомобиля при использовании съемных кузовов меньше на 17 % по сравнению с перевозками в стандартных контейнерах, что связано с увеличенным количеством легковых автомобилей в составе такого поезда (+25 %, см. табл. 1).

### Заключение

Преимущество предлагаемого концепта по сравнению с использованием стандартных контейнеров состоит в следующем:

- увеличено количество перевозимых автомобилей;
- расширена номенклатура перевозимых автомобилей за счет увеличенных внутренних размеров секции съемного кузова по высоте и ширине;
- снижена трудоемкость работ по размещению и закреплению автомобилей за счет увеличенных внутренних размеров, двухъярусной погрузки и применения типовых колесных упоров;
- обеспечена возможность поездной загрузки с торцевой погрузочной площадки (рампы, аппарели, эстакады) путем сквозного проезда автомобилей по всему составу поезда.

Выполнена ориентировочная оценка стоимости расходов при железнодорожной транспортировке легковых автомобилей в предложенном съемном кузове, установленном на длиннобазный вагон-платформу, по результатам которой можно сделать вывод, что применение предложенных решений позволяет перевозить больше автомобилей в составе поезда (на 25 %) при меньшей стоимости перевозки одного автомобиля на 17 % в сравнении с перевозками в стандартных крупнотоннажных контейнерах.

При этом, как отмечено в работе [9], увеличенная по сравнению со стандартным контейнером ширина съемного кузова не позволяет использовать съемные кузова в мультимодальных перевозках.

По совокупности погрузочных характеристик предложенный концепт уступает новейшему грузовому вагону-автомобилевозу компании «РМ Рейл» – двухсекционному вагону модели 11-1291-01, сертифицированному в 2025 г. [14], но превосходит способы перевозки автомобилей в крупнотоннажных контейнерах со стандартными размерами по ГОСТ 53350 [3].

Разработанное техническое решение выполнено специалистами АО «НВЦ “Вагоны”» в рамках актуальных исследований в области повышения эффективности использования вагонов-платформ и контейнерных перевозок [15–23], запатентовано [24] и может быть использовано в дальнейших разработках АО «НВЦ “Вагоны”» и компании «РМ Рейл».

### Список литературы

- 1 **Алешина, А.** Импорт автомобилей растет, но в обход железнодорожной сети / А. Алешина // РЖД Партнер.ру. – 13.01.2025. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/logistics/reviews/import-avtomobiley-rastet-no-v-obkhod-zheleznodorozhnoy-seti/> (дата обращения: 12.01.2026).
- 2 Контейнеры. Дайджест, апрель / АО «ИЭРТ», 2025. – 32 с. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/11680/page/103290?id=21100#main-header> (дата обращения: 12.01.2026).
- 3 **ГОСТ Р 53350–2009 (ИСО 668:1995).** Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и масса : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 мая 2009 г. № 181-ст. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 16 с.
- 4 **Бороненко, Ю. П.** Выбор и анализ конструктивных решений основания съемного кузова / Ю. П. Бороненко, О. И. Зайнитдинов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2021. – Т. 18, № 2. – С. 273–282. – DOI 10.20295/1815-588X-2021-2-273-282.
- 5 **Даукша, А. С.** Совершенствование вагонов на основе использования съемных кузовов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав

### References

- 1 **Aleshina, A.** Car imports are growing, but bypassing the railway network / A. Aleshina // RZD Partner.ru – January 13, 2025. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/logistics/reviews/import-avtomobiley-rastet-no-v-obkhod-zheleznodorozhnoy-seti/> (date of access: 12.01.2026).
- 2 Containers. Digest, April / JSC IERT, 2025. – 32 p. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/11680/page/103290?id=21100#main-header> (date of access: 12.01.2026).
- 3 **GOST R 53350–2009 (ISO 668:1995).** Series 1 freight containers. Classification, dimensions, and mass : national standard of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated May 27, 2009, No. 181-st. – Moscow : Standartinform, 2018. – 16 p.
- 4 **Boronenko, Yu. P.** Selection and analysis of design solutions for the base of a swap body / Yu. P. Boronenko, O. I. Zaynitdinov // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2021. – Vol. 18, No. 2. – P. 273–282. – DOI 10.20295/1815-588X-2021-2-273-282.
- 5 **Dauksha, A. S.** Improvement of cars based on the use of swap bodies : specialty 05.22.07 "Roll-

железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Даукша Анфиса Сергеевна. – Санкт-Петербург, 2018. – 142 с. – EDN EDNSFO.

6 **Бороненко, Ю. П.** Выбор конструктивных решений устройств крепления контейнеров и съемных кузовов на железнодорожных платформах / Ю. П. Бороненко, А. С. Даукша // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 3 (70). – С. 29–32. – ISSN 1994-831X.

7 **Бороненко, Ю. П.** Маркетинговое исследование логистики железнодорожной перевозки грузов в съемных кузовах / Ю. П. Бороненко, О. Д. Покровская, Т. С. Титова // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 3. – С. 157–172. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-3-157-172.

8 **Бороненко, Ю. П.** Результаты исследования востребованности съемных кузовов и железнодорожного подвижного состава для их перевозки / Ю. П. Бороненко, О. Д. Покровская, Т. С. Титова // Транспорт Российской Федерации. – 2024. – № 2 (111). – С. 25–31. – ISSN 1994-831X.

9 **Ворон, О. А.** Методология исследования потребностей развития транспортной инфраструктуры и подвижного состава для перевозок скоропортящихся грузов / О. А. Ворон // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19, № 3 (94). – С. 6–15. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-3-1.

10 Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах : утверждены МПС России № ЦМ-943 от 27 мая 2003 г. – Москва : Юридическая фирма «Юртранс», 2003. – 576 с.

11 **Патент на полезную модель № 228557 U1 Российская Федерация, МПК В60Р 3/077, В61D 3/18, В61D 45/00.** Упор для крепления колес автомобильного полуприцепа на вагоне-платформе : № 2024116427 : заявл. 14.06.2024 : опубл. 03.09.2024 / Л. В. Цыганская, Д. Г. Бейн, В. А. Чернов [и др.] ; заявитель Акционерное общество «Федеральная грузовая компания». – 8 с.

12 Постановление ФЭК России от 17.06.2003 N 47-т/5 (ред. от 07.06.2023) «Об утверждении Прейскуранта N 10-01 «Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами» (Тарифное руководство N 1, части 1 и 2)» (зарегистрировано в Минюсте России 09.07.2003 N 4882). – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=2184> (дата обращения: 12.01.2026).

ing stock of railways, train traction and electrification" : dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Dauksha Anfisa Sergeevna, 2018. – 142 p. – EDN EDNSFO.

6 **Boronenko, Yu. P.** Selection of design solutions for devices for securing containers and swap bodies on railway platforms / Yu. P. Boronenko, A. S. Dauksha // Transport of the Russian Federation. – 2017. – No. 3 (70). – P. 29–32. – ISSN 1994-831X.

7 **Boronenko, Yu. P.** Marketing research of logistics of rail transportation of goods in swap bodies / Yu. P. Boronenko, O. D. Pokrovskaya, T. S. Titova // Bulletin of scientific research results. – 2023. – No. 3. – P. 157–172. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-3-157-172.

8 **Boronenko, Yu. P.** Results of the study of the demand for swap bodies and railway rolling stock for their transportation / Yu. P. Boronenko, O. D. Pokrovskaya, T. S. Titova // Transport of the Russian Federation. – 2024. – No. 2 (111). – P. 25–31. – ISSN 1994-831X.

9 **Voron, O. A.** Methodology for studying the needs for the development of transport infrastructure and rolling stock for the transportation of perishable goods / O. A. Voron // World of Transport and Transportation Journal. – 2021. – Vol. 19, No. 3 (94). – P. 6–15. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-3-1.

10 Technical conditions for the placement and fastening of goods in wagons and containers : approved by the Ministry of Railways of Russia No. CM-943 dated May 27, 2003 – Moscow : Yurtrans Law Firm, 2003. – 576 p.

11 **Patent for utility model No. 228557 U1 Russian Federation, IPC B60P 3/077, B61D 3/18, B61D 45/00.** Stop for fastening the wheels of a semi-trailer on a flatcar : No. 2024116427 : declared 14.06.2024 : published 03.09.2024 / L. V. Tsyganskaya, D. G. Bein, V. A. Chernov [et al.] ; applicant Joint-Stock Company "Federal Freight Company". – 8 p.

12 Resolution of the FEC of Russia dated 17.06.2003 N 47-t/5 (as amended on 07.06.2023) “On Approval of the Price List N 10-01 “Tariffs for cargo transportation and infrastructure services performed by Russian Railways” (Tariff Guidelines N 1, Parts 1 and 2)” (registered with the Ministry of Justice of Russia on 09.07.2003 N 4882). – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=2184> (date of access: 12.01.2026).

13 Расчет стоимости и экологичности грузовых перевозок // РЖД-Грузовые перевозки. – URL: <https://cargolk.rzd.ru/services/calculator> (дата обращения: 12.01.2026).

14 «РМ Рейл» сертифицировала восьмиосный автомобилевоз // Гудок. – 2025, 09 окт. – URL: <https://gudok.ru/news/?ID=1726139> (дата обращения: 12.01.2026).

15 О недоиспользовании грузоподъемности универсальных вагонов-платформ при использовании съёмных многооборотных средств крепления грузов / Д. Г. Бейн, Л. В. Цыганская, Н. А. Таничева, Т. М. Чернова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4 (96). – С. 192–201. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_4\_192.

16 **Цыганская, Л. В.** Проектирование и расчет элементов крепления съёмных многооборотных средств для перевозки грузов в универсальных вагонах-платформах / Л. В. Цыганская, Н. А. Таничева, Д. Г. Бейн // Бюллетень результатов научных исследований. – 2025. – № 1. – С. 18–30. – DOI 10.20295/2223-9987-2025-1-18-30.

17 **Бейн, Д. Г.** Выбор технико-экономических параметров вагонов-платформ с погрузочной длиной 60 футов с учетом их тарификации и параметров грузового поезда / Д. Г. Бейн, Л. В. Цыганская, Н. А. Таничева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3 (99). – С. 41–53. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_41.

18 **Цыганская, Л. В.** Исследование эксплуатационных отказов длиннобазных вагонов-платформ / Л. В. Цыганская, Д. Г. Бейн // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2025. – № 4 (119). – С. 62–64. – EDN FYULGF.

19 **Цыганская, Л. В.** Проектирование и расчет элементов крепления съёмных многооборотных средств для перевозки грузов в универсальных вагонах-платформах / Л. В. Цыганская, Н. А. Таничева, Д. Г. Бейн // Бюллетень результатов научных исследований. – 2025. – № 1. – С. 18–30. – DOI 10.20295/2223-9987-2025-1-18-30.

20 **Цыганская, Л. В.** Выбор схем нагружения для оценки на сопротивление усталости элементов рам вагонов-платформ / Л. В. Цыганская, А. Н. Смирнов, Д. Г. Бейн // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2024. – Т. 21, № 4. – С. 787–800. – DOI 10.20295/1815-588X-2024-04-787-800.

13 Calculation of cost and environmental friendliness of freight transportation // Russian Railways- Freight Transportation. – URL: <https://cargolk.rzd.ru/services/calculator> (date of access: 12.01.2026).

14 M Rail certified an eight-axle car carrier / Gudok. – 2025, 09 October. – URL: <https://gudok.ru/news/?ID=1726139> (date of access: 12.01.2026).

15 On underutilization of the loading capacity of universal flat cars using removable multi-turn cargo securing means / D. G. Bein, L. V. Tsyganskaya, N. A. Tanicheva, T. M. Chernova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 4 (96). – P. 192–201. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_4\_192.

16 **Tsyganskaya L. V.** Design and calculation of fastening elements of removable multi-turn means for transporting goods in universal flatcars / L. V. Tsyganskaya, N. A. Tanicheva, D. G. Bein // Bulletin of scientific research results. – 2025. – No. 1. – P. 18–30. – DOI 10.20295/2223-9987-2025-1-18-30.

17 **Bein, D. G.** Selection of technical and economic parameters of flat cars with a loading length of 60 feet, taking into account their pricing and freight train parameters / D. G. Bein, L. V. Tsyganskaya, N. A. Tanicheva // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 3. – P. 41–53. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_41.

18 **Tsyganskaya, L. V.** Study of operational failures of long-wheelbase flat cars / L. V. Tsyganskaya, D. G. Bein // Transport of the Russian Federation. Journal of science, practice, economics. – 2025. – No. 4 (119). – P. 62–64. – EDN FYULGF.

19 **Tsyganskaya L. V.** Design and calculation of fastening elements of removable multi-turn means for cargo transportation in universal flatcars / L. V. Tsyganskaya, N. A. Tanicheva, D. G. Bein // Bulletin of scientific research results. – 2025. – No. 1. – P. 18–30. – DOI 10.20295/2223-9987-2025-1-18-30.

20 **Tsyganskaya, L. V.** Selection of loading schemes for assessing the fatigue resistance of flatcar frame elements / L. V. Tsyganskaya, A. N. Smirnov, D. G. Bein // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2024. – Vol. 21, No. 4. – P. 787–800. – DOI 10.20295/1815-588X-2024-04-787-800.

21 Экспериментальная оценка динамической нагруженности контейнеров для насыпных грузов при соударении в ходе железнодорожной транспортировки / Л. В. Цыганская, А. Н. Смирнов, Д. Г. Бейн, Т. А. Расулов // Транспортное дело России. – 2025. – № 5. – С. 227–231. – ISSN 2072-8689.

22 Перспективный способ перевозки труб большого диаметра с различной длиной / Л. В. Цыганская, Н. А. Таничева, Д. Г. Бейн, Н. А. Атаманчук // Наука и техника транспорта. – 2025. – № 3. – С. 25–30. – ISSN 2074-9325.

23 Патент на полезную модель № 216101 U1 Российская Федерация, МПК В61D 19/00. Съёмный кузов транспортного средства : № 2021139988 : заявл. 30.12.2021 : опубл. 17.01.2023 / Ю. П. Бороненко, Л. В. Цыганская, Д. Г. Бейн [и др.] ; заявитель Акционерное общество «Научно-внедренческий центр “Вагоны”», Акционерное общество «Евросиб СПб-Транспортные Системы». – 9 с.

24 Патент на полезную модель № 235088 U1 Российская Федерация, МПК В61D 3/18, В60P 3/07. Съёмное многооборотное средство для перевозки автомобилей на вагоне-платформе : № 2025102546 : заявл. 06.02.2025 : опубл. 20.06.2025 / Ю. П. Бороненко, Л. В. Цыганская, В. А. Чернов [и др.] ; заявитель Акционерное общество «Научно-внедренческий центр “Вагоны”». – 8 с.

21 Experimental assessment of the dynamic loading of bulk cargo containers upon collision during rail transportation / L. V. Tsyganskaya, A. N. Smirnov, D. G. Bein, T. A. Rasulov // Transport Business of Russia. – 2025. – No. 5. – P. 227–231. – ISSN 2072-8689.

22 A promising method for transporting large-diameter pipes of different lengths / L. V. Tsyganskaya, N. A. Tanicheva, D. G. Bein, N. A. Atamanchuk // Science and Technology of Transport. – 2025. – No. 3. – P. 25–30. – ISSN 2074-9325.

23 Patent for Utility Model No. 216101 U1 Russian Federation, IPC B61D 19/00. Removable vehicle body : No. 2021139988 : declared 30.12.2021 : published 17.01.2023 / Yu. P. Boronenko, L. V. Tsyganskaya, D. G. Bein [et al.] ; applicant Joint-Stock Company "Research and Implementation Center "Wagons", Joint-Stock Company "Eurosib SPb-Transport Systems". – 9 p.

24 Patent for Utility Model No. 235088 U1 Russian Federation, IPC B61D 3/18, B60P 3/07. Removable reusable vehicle for transporting cars on a flatcar : declared 06.02.2025 : published 20.06.2025 / Yu. P. Boronenko, L. V. Tsyganskaya, V. A. Chernov [et al.] ; applicant Joint-Stock Company "Research and Implementation Center "Wagons". – 8 p.

*D. G. Bein, L. V. Tsyganskaya*

## **RATIONALE FOR THE DESIGN OF A TWO-SECTION REMOVABLE BODY FOR TRANSPORTING PASSENGER CARS ON LONG-WHEEL FLAT CARS**

**Abstract.** This article examines methods for transporting automobiles in standard large-capacity containers with dimensions in accordance with GOST R 53350 and describes the shortcomings of these methods. A mathematical formulation of the problem for determining the maximum dimensions of a swap body compatible with a container flatcar is presented. An example of calculating the cross-sectional dimensions of this swap body is provided. Preliminary technical and economic parameters are determined for a swap body consisting of two separate sections. Its use increases the number of transported passenger cars by 25% compared to standard 1AA (1AAA) general cargo containers in accordance with GOST R 53350, while reducing the labor intensity of installing and securing the cars. An approximate cost estimate for rail transportation of passenger cars in the two-section swap body under consideration was provided. The proposed technical solutions can be applied to transporting cars on long-wheel-base flatcars.

**Keywords:** container train, flatcar, swap body, high-capacity container, car-carrying car.

**For citation:** Bein, D. G. Rationale for the design of a two-section removable body for transporting passenger cars on long-wheel flat cars / D. G. Bein, L. V. Tsyganskaya / Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 66–81. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_66.

**Сведения об авторах****Бейн Дмитрий Григорьевич**

Акционерное общество «Научно-внедренческий центр “Вагоны”» (АО «НВЦ “Вагоны”»),  
Научно-исследовательское бюро (НИБ),  
кандидат технических наук, заместитель  
главного конструктора НИБ,  
действительный член Российской академии  
транспорта,  
e-mail: dgbain@mail.ru

**Цыганская Людмила Валериевна**

Акционерное общество «Научно-внедренческий центр “Вагоны”» (АО «НВЦ “Вагоны”»),  
Петербургский государственный университет  
путей сообщения  
Императора Александра I (ПГУПС),  
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,  
кандидат технических наук, доцент, заместитель  
генерального директора –  
главный конструктор НИБ,  
e-mail: lyudmila.cyganskaya@nvc-vagon.ru

**Information about the authors****Bein Dmitry Grigorievich**

Joint-Stock Company «Scientific  
and Implementation Center "Vagony"»  
(JSC «NVC "Vagony"»),  
Scientific Research Bureau (NIB),  
Candidate of Engineering Sciences,  
Deputy Chief Designer of NIB,  
Full Member of the Russian Academy of Transport,  
e-mail: dgbain@mail.ru

**Tsyganskaya Lyudmila Valerievna**

Joint-Stock Company «Scientific  
and Implementation Center "Vagony"»  
(JSC «NVC "Vagony"»),  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport  
University (PGUPS),  
Chair “Wagons and Wagon Facilities”,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
Deputy General Director – Chief Designer of NIB,  
e-mail: lyudmila.cyganskaya@nvc-vagon.ru

*С. В. Буриков, Л. В. Цыганская*

## УТОЧНЕННАЯ ОЦЕНКА ОБЩЕГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ВАГОНОВ-ТЕРМОСОВ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ \*

**Аннотация.** Целью работы является разработка и апробация уточненной методики оценки общего коэффициента теплопередачи изотермического подвижного состава, учитывающей основные особенности ограждающих конструкций, влияющих на теплотехнические характеристики вагонов-термосов, к которым относятся: конструкция и способ уплотнения дверного проема и двери, соединение стен с крышей и рамой, соединение между боковой и торцевой стеной, конструктивные тепловые мостики, гидрозатвор (сливной прибор).

Расчет коэффициента теплопередачи вагона-термоса выполнялся по аналитическим зависимостям и уточненной методике, полученные результаты верифицировались по данным натурных испытаний и показали высокую степень сходимости с результатами натурных экспериментов, расхождение не превысило 5 %.

Уточненная методика может быть использована при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при создании и совершенствовании конструкций изотермического подвижного состава, в том числе с использованием новых технологий изготовления и материалов.

**Ключевые слова:** изотермический подвижной состав, вагон-термос, коэффициент теплопередачи, теплотехнический расчет, ограждающая конструкция кузова.

**Для цитирования:** Буриков, С. В. Уточненная оценка общего коэффициента теплопередачи вагонов-термосов на этапе проектирования / С. В. Буриков, Л. В. Цыганская // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 82–89. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_82.

### **Введение**

Ожидаемое массовое списание вагонов-термосов по истечении уже продленного срока их службы требует организации массового производства изотермических и рефрижераторных вагонов в Российской Федерации. В этих условиях особую важность приобретает уточненный расчет теплотехнических характеристик на стадии проектирования создаваемых изотермических вагонов с применением эффективных теплоизолирующих материалов (пенополиуретан, пенополистирол и др.) [1, 2].

Основным технико-эксплуатационным показателем, определяющим способность вагона-термоса поддерживать необходимый температурный режим, является общий коэффициент теплопередачи кузова  $K$ . Величина коэффициента теплопередачи в соответствии с действующими нормативами [3] должна составлять:

- для вагонов-термосов с нормальной изоляцией не более  $0,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;
- для моделей с усиленной теплоизоляцией не более  $0,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Соблюдение данных требований гарантирует, что вагон сможет поддерживать стабильную температуру внутри грузового пространства даже при длительных перевозках в условиях широкого спектра наружных температур от  $-60$  до  $+50$ . Это особенно важно для перевозки скоропортящихся продуктов, фармацевтических грузов и других термочувствительных материалов, где отклонение от заданного температурного режима может привести к порче товара.

Точное прогнозирование теплотехнических характеристик на этапе проектирования позволяет избежать дорогостоящих доработок и повторных натурных испытаний изотермических вагонов. Существующие методы расчета не позволяют с достаточной степенью точности определять значение общего коэффициента теплопередачи вагона [4, 5], расхождение с испытаниями может составлять от 30 до 50 %.

Таким образом, совершенствование методики расчета теплотехнических характеристик вагонов-термосов является актуальной задачей, решение которой позволит с большей степенью достоверности прогнозировать значение общего коэффициента теплопередачи кузова изотермического вагона.

---

\* Исследование выполнено в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

### Основная часть

Уточненная методика основывается на методе конечных элементов (МКЭ) и по сравнению с аналитическими методами расчета [4–7] позволяет рассчитать тепловой поток в зонах конструкции, имеющих сложную конфигурацию, такие как: дверной проем и дверь с уплотнениями, соединение стен с крышей и рамой, соединение между боковой и торцевой стеной, конструктивных тепловых мостиков, гидрозатвор (сливной прибор). Конструктивные тепловые мостики (зоны с наибольшей теплопроводностью) представляют собой элементы ограждающей конструкции, служащие для соединения внутренней и наружной обшивки кузова, исключить которые не представляется возможным по конструктивным или технологическим причинам.

Расчет по уточненной методике выполняется в несколько этапов [8–10]:

- на первом этапе разрабатывается 3D-модель в программном комплексе SolidWorks, Компас-3D и др. ограждающей конструкции изотермического вагона;
- на втором этапе в программном комплексе Ansys Workbench выполняется подготовка к расчету, задаются граничные условия (условия симметрии при использовании симметричной конструкции, температура внутри и снаружи вагона, тепловые притоки) и применяемые материалы;
- на третьем этапе проводится расчет, определяется затраченная мощность при выравненной температуре между наружными и внутренними поверхностями ограждающей конструкции изотермического вагона;
- на четвертом этапе оцениваются результаты теплотехнического расчета по критерию затрат мощности теплового потока и по формуле (1) определяется общий коэффициент теплопередачи вагона [3, 10]

$$K = \frac{Q_m}{F_{cp} (\Delta t)} ; \quad (1)$$

где  $Q_m$  – затраченная мощность теплового потока, Вт;  
 $\Delta t$  – разница температур на наружной и внутренней поверхности грузового отделения вагона, К;  
 $F_{cp}$  – средняя площадь грузового отделения вагона, м<sup>2</sup>, определяется по формуле (2) [4, 5]

$$F_{cp} = \sqrt{F_n \cdot F_{вн}} . \quad (2)$$

В качестве примера применения уточненной методики был проведен теплотехнический расчет вагона-термоса модели 16-1807-04, разработанного ООО «ГСКБВ» и поставленного на производство ТОО «Cool Infinity», модель вагона приведена на рис. 1. Технические характеристики вагона приведены в табл. 1.

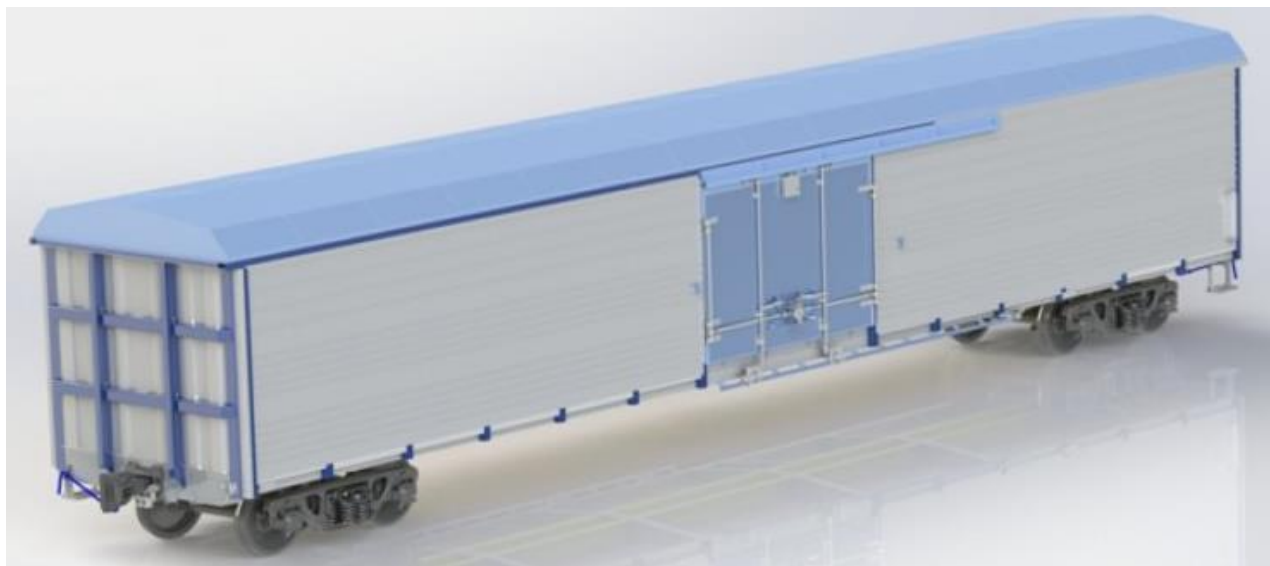


Рис. 1. Вагон-термос модели 16-1807-04

Таблица 1

## Техническая характеристика вагона-термоса модели 16-1807-04

Наименование параметра и размерность	Значение
Грузоподъемность, т	60,0
Масса тары (максимальная), т	36,0
Объем кузова, м <sup>3</sup>	145,0
Площадь пола, м <sup>2</sup>	50,5
Коэффициент теплопередачи ограждений кузова, Вт/м <sup>2</sup> ·град	0,2...0,3
Наружная поверхность кузова вагона, м <sup>2</sup>	242,6
Внутренняя поверхность кузова вагона, м <sup>2</sup>	212,9

Для проведения теплотехнического расчета была разработана конечно-элементная модель вагона-термоса модели 16-1807-04 (рис. 2). Для сокращения времени расчета в модели учтены условия симметрии относительно продольной и поперечной осей вагона.

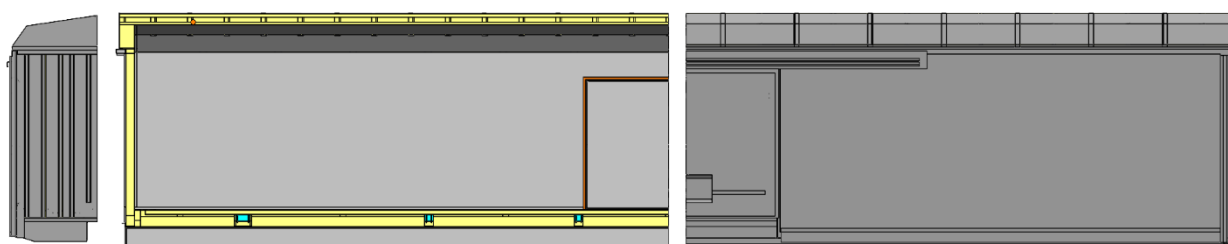


Рис. 2. Расчетная модель вагона-термоса модели 16-1807-04

Материалы элементов конструкции вагона-термоса, а также коэффициенты их теплопроводности приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Коэффициенты теплопроводности материалов, применяемых в вагоне-термосе модели 16-1807-04

Материал	$\lambda$ , Вт/(м·град)
Пенополиуретан (двухкомпонентная напыляемая пенополиуретановая система Daltotherm TSW 40-01 ТУ 20.16.40-068-10861980)	0,023
Стеклотекстолит (стеклотекстолит электротехнический листовой СТЭФ-У ТУ 2296-023-25082401)	0,29
Дерево (сосна):	
– поперек волокон	0,14
– вдоль волокон	0,29
Сталь 09Г2С (Ст3)	47,0
Уплотнитель (резина мягкая)	0,225
Стеклоткань	0,036

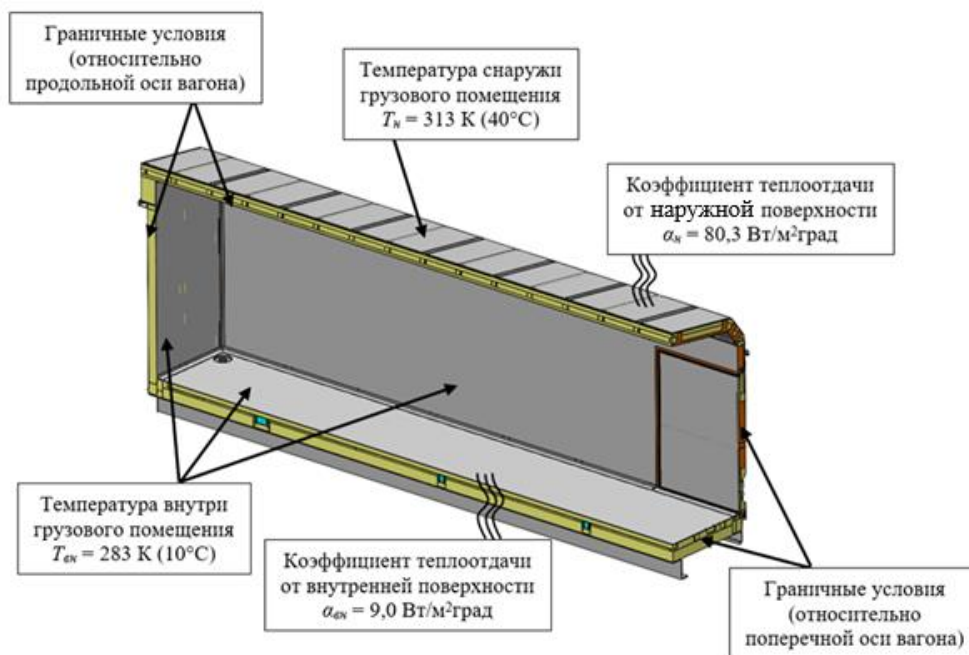
Для расчета общего коэффициента теплопроводности задавались следующие граничные условия:

- условия симметрии относительно продольной и поперечной оси вагона;
- температура внутри грузового помещения кузова вагона принималась  $T_{вн} = 283$  К (10 °С);
- температура снаружи вагона принималась  $T_{н} = 313$  К (40 °С);
- коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности ограждений грузового помещения вагона при естественной циркуляции воздуха принимался равным  $\alpha_в = 9$ , Вт/(м<sup>2</sup>·град);
- коэффициент теплоотдачи от воздуха к наружной поверхности ограждения грузового помещения вагона  $\alpha_н$  определялся по формуле (3) [4, 5]

$$\alpha_n = 1,16 \left( 4,2 + 13\sqrt{V} \right), \quad (3)$$

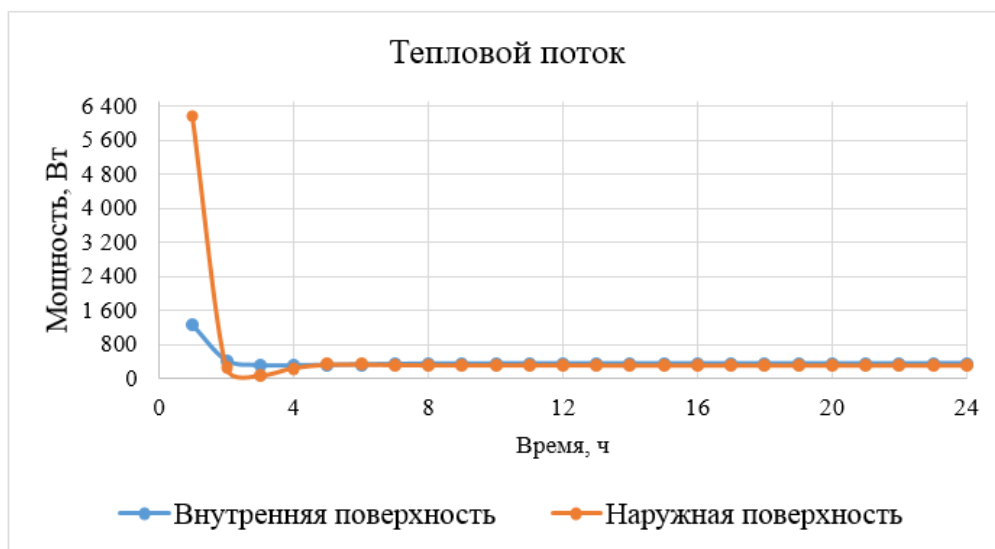
где  $V$  – эксплуатационная скорость  $V = 25$  м/с (90 км/ч);  
– изменение температуры рассчитывалось во времени в течение 24 ч.

Условия термического нагружения вагона-термоса модели 16-1807-04 приведены на рис. 3.



**Рис. 3. Условия термического нагружения**

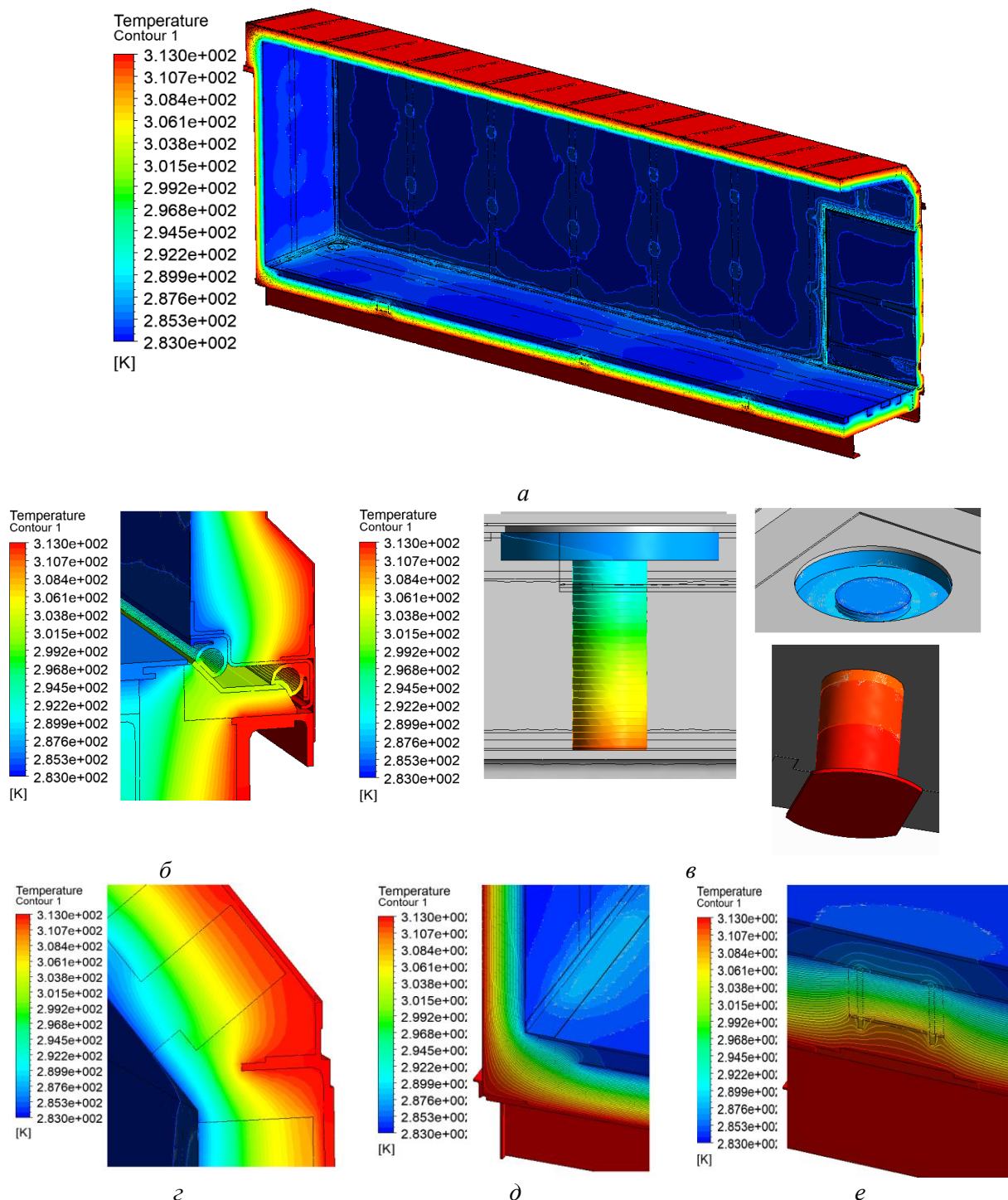
В процессе расчета определена необходимая затраченная тепловая мощность для выравнивания температуры между наружными и внутренними поверхностями ограждающей конструкции кузова вагона. На рис. 4 приведен график распределения затраченной мощности теплового потока, полученный при проведении теплотехнического расчета.



**Рис. 4. График распределения затраченной мощности**

Как видно из графика, затраченная мощность теплового потока между внутренними и наружными поверхностями кузова вагона спустя четыре часа стабилизируется и составляет 409,8 Вт. Учитывая, что расчет производился для четвертой части кузова вагона, общая затраченная мощность на весь вагон составит 1,64 кВт.

Графическая интерпретация результатов расчета, а именно распределение температурных полей в ограждающей конструкции вагона-термоса модели 16-1807-04, приведена на рис. 5.



**Рис. 5. Распределение температурного поля по ограждающей конструкции кузова вагона-термоса модели 16-1807-04:**

*а* – общий вид; *б* – дверной проем; *в* – гидрозатвор; *г* – стыковка крыши с боковой стеной; *д* – стыковка торцевой стены с рамой вагона; *е* – тепловой мост в раме

Из результатов, представленных на рис. 5, следует, что основные потери тепла в конструкции вагона-термоса модели 16-1807-04 происходят в районе дверного проема, гидрозатвора и в местах конструктивных тепловых мостиков кузова вагона.

Подставив значения в формулу (1) и (2), в результате расчета по уточненной методике получим общий коэффициент теплопередачи ограждающей конструкции вагона-термоса, которая составила  $K = 0,249$  Вт/м<sup>2</sup>·град. При этом на этапе проектирования вагона-термоса модели 16-1807-04 теплотехнический расчет выполнялся аналитическим методом [4, 5], и общий коэффициент теплопередачи вагона составил  $K = 0,22$  Вт/м<sup>2</sup>·град.

По результатам теплотехнических испытаний, проведенных АО «НИИАС», коэффициент теплопередачи изотермического вагона-термоса модели 16-1807-04 составил 0,26 Вт/м<sup>2</sup>·град [11]. Расхождение результатов теплотехнических испытаний с расчетом по уточненной методике составило 4,8 %.

### **Выводы**

На основании проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1 Предложена и апробирована уточненная методика теплотехнического расчета вагонов-термосов на основе МКЭ. Ключевым преимуществом данной методики является возможность точного моделирования тепловых потоков в сложных конструктивных зонах (дверные проемы с уплотнениями, стыки панелей, тепловые мостики), что было недоступно при использовании традиционных аналитических методов. Уточненная методика позволяет не только получить более достоверную оценку, но и выявить «слабые» места конструкции на ранних стадиях проектирования.

2 Проведенный анализ выявил зоны наибольших теплопотерь в конструкции вагона, к которым относятся дверной проем и места расположения конструктивных тепловых мостиков. Это указывает на необходимость особого внимания к проектированию и герметизации данных узлов для дальнейшей оптимизации теплотехнических характеристик.

3 Сравнение полученных коэффициентов теплопередачи с результатами испытаний позволяет сделать вывод, что уточненная методика показала высокую степень сходимости, расхождение не превысило 5 % по сравнению с расхождением с аналитическим методом расчета, которое составляет ~20 %.

Таким образом, уточненная методика на основе МКЭ является эффективным инструментом для прогнозирования теплотехнических характеристик вагонов-термосов с высокой степенью достоверности. Ее внедрение в практику проектирования позволит сократить затраты на дорогостоящие доработки и натурные испытания, обеспечивая создание подвижного состава, гарантированно отвечающего требованиям по сохранности скоропортящихся и термочувствительных грузов.

### **Список литературы**

- 1 Направления совершенствования технико-экономических и эксплуатационных параметров перспективных изотермических вагонов / О. А. Ворон, Ю. П. Булавин, О. В. Зиберов, Б. Г. Гаврилов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (50). – С. 18–21. – ISSN 1818-5509.
- 2 **Бороненко, Ю. П.** Экспериментальные исследования новых конструктивных решений ограждения кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров / Ю. П. Бороненко, Б. А. Абдуллаев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 498–513. – DOI 10.20295/1815-588X-2020-4-498-513.
- 3 Соглашение о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок (СПС) 2024. – URL: <https://unece.org/transport/publications/agreement-international-carriage-perishable-foodstuffs-and-special-6> (дата обращения: 01.07.2025).
- 4 **Яковлев, И. Н.** Изотермический подвижной состав / И. Н. Яковлев, М. М. Шаповаленко. – Москва : Транспорт, 1977. – 230 с.
- 5 **Ягодин, С. К.** Изотермический подвижной состав / С. К. Ягодин, В. А. Саутенков. – Москва : Транспорт, 1986. – 192 с.
- 6 **Михеев, М. А.** Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Изд. 2-е, стер. – Москва : Энергия, 1977. – 343 с.

### **References**

- 1 Directions for improving the technical, economic and operational parameters of promising insulated wagons / O. A. Voron, Yu. P. Bulavin, O. V. Ziberov, B. G. Gavrilov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2020. – No. 1 (50). – P. 18–21. – ISSN 1818-5509.
- 2 **Boronenko, Yu. P.** Experimental studies of new constructive solutions for enclosing the bodies of refrigerated cars and containers / Yu. P. Boronenko, B. A. Abdullaev // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2020. – Vol. 17, No. 4. – P. 498–513. – DOI 10.20295/1815-588X-2020-4-498-513.
- 3 Agreement on the International transportation of perishable foodstuffs and on special vehicles intended for these transportation (ATP) 2024. – URL: <https://unece.org/transport/publications/agreement-international-carriage-perishable-foodstuffs-and-special-6> (date of access: 01.07.2025).
- 4 **Yakovlev, I. N.** Isothermal rolling stock / I. N. Yakovlev, M. M. Shapovalenko. – Moscow : Transport, 1977. – 230 p.
- 5 **Yagodin, S. K.** Isothermal rolling stock / S. K. Yagodin, V. A. Sautenkov. – Moscow : Transport, 1986. – 192 p.
- 6 **Mikheev, M. A.** Fundamentals of heat transfer / M. A. Mikheev, I. M. Mikheeva. – Ed. 2nd, stereotype. – Moscow : Energy, 1977. – 343 p.

7 **Нащокин, В. В.** Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1975. – 496 с.

8 **Бубнов, В. М.** Методика расчета общего коэффициента теплопередачи ограждений изотермического подвижного состава / В. М. Бубнов, Л. В. Цыганская, С. В. Буриков // V Бетанкуровский международный инженерный форум : сборник трудов в 2 т., Санкт-Петербург, 29 ноября – 01 декабря 2023 года. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2023. – С. 128–132.

9 **Буриков, С. В.** Увеличение вместимости изотермических вагонов за счет уточненного выбора технических решений конструкций теплоизоляции / С. В. Буриков, Л. В. Цыганская // Транспорт : проблемы, идеи, перспективы : сборник трудов LXXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–22 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. – С. 262–267.

10 **Буриков, С. В.** Уточнение методов теплотехнических расчетов изотермического подвижного состава / С. В. Буриков, Л. В. Цыганская, В. М. Бубнов // Железнодорожный подвижной состав : проблемы, решения, перспективы : материалы Третьей Международной научно-технической конференции, Ташкент, 17–20 апреля 2024 года. – Ташкент : Ташкентский государственный транспортный университет, 2024. – С. 76–83.

11 Заключение по результатам предварительных теплотехнических испытаний опытного образца опытного образца изотермического вагона-термоса модели 16-1807-04, созданного по ТУ У 35.2-32258888-621:2011. – Москва : ОАО «НИИАС», 2013.

7 **Nashchokin, V. V.** Technical thermodynamics and heat transfer / V.V. Nashchokin. – Ed. 2nd, revised and additional. – Moscow : Higher School, 1975. – 496 p.

8 **Bubnov, V. M.** Methodology for calculating the total heat transfer coefficient of enclosures of isothermal rolling stock / V. M. Bubnov, L. V. Tsyganskaya, S. V. Burikov // V Betancourt International Engineering Forum : Proceedings in 2 vol., Saint Petersburg, November 29 – December 01, 2023. – Saint Petersburg : Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2023. – P. 128–132.

9 **Burikov, S. V.** Increasing the capacity of insulated wagons due to an updated choice of technical solutions for thermal insulation structures / S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya // Transport : problems, ideas, prospects : proceedings of the LXXXIV All-Russian scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists, Saint Petersburg, April 15-22, 2024. – Saint Petersburg : Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2024. – P. 262–267.

10 **Burikov, S. V.** Refinement of methods of thermal engineering calculations of isothermal rolling stock / S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya, V. M. Bubnov // Railway rolling stock : problems, solutions, prospects : materials of the third international scientific and technical conference, Tashkent, April 17–20, 2024. Tashkent : Tashkent State Transport University, 2024. – P. 76–83.

11 Conclusion based on the results of preliminary thermal engineering tests of the prototype of an insulated thermos car, model 16-1807-04, created according to TU U 35.2-32258888-621:2011. – Moscow : JSC “NIAS”, 2013.

*S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya*

#### **AN UPDATED ESTIMATE OF THE TOTAL HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF THERMOS WAGONS AT THE DESIGN STAGE**

**Abstract.** The objective of this study is to develop and test a refined methodology for estimating the total heat transfer coefficient of isothermal rolling stock. This methodology takes into account the main features of enclosing structures that affect the thermal characteristics of thermos cars, which include: the design and sealing method of the doorway and door, the connection of walls with the roof and frame, the connection between the side and end wall, structural thermal bridges, a water lock (drain device).

The calculation of the heat transfer coefficient of the thermos car was carried out according to analytical dependencies and a refined methodology. The results were verified using full-scale testing data and demonstrated a high degree of agreement with the results of full-scale experiments, with a discrepancy of no more than 5%.

The updated methodology can be used in carrying out research and development work in the creation and improvement of structures of insulated rolling stock, including using new manufacturing technologies and materials.

**Keywords:** isothermal rolling stock, thermos car, heat transfer coefficient, thermal engineering calculation, car body enclosure.

**For citation:** Burikov, S. V. An updated estimate of the total heat transfer coefficient of thermos cars at the design stage / S. V. Burikov, L. V. Tsyganskaya // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 82–89. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_82.

#### Сведения об авторах

**Буриков Сергей Витальевич**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство», аспирант,  
e-mail: b.s.v.3479@gmail.com

**Цыганская Людмила Валериевна**

Акционерное общество «Научно-внедренческий центр «Вагоны»» (АО «НВЦ «Вагоны»»), Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство», кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора – главный конструктор НИБ,  
e-mail: lyudmila.cyganskaya@nvc-vagon.ru

#### Information about the authors

**Burikov Sergey Vitalievich**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), Chair “Wagons and Wagon Facilities”, Postgraduate Student,  
e-mail: b.s.v.3479@gmail.com

**Tsyganskaya Lyudmila Valerievna**

Joint-Stock Company «Scientific and Implementation Center “Vagony”» (JSC «NVC “Vagony”»), Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), Chair “Wagons and Wagon Facilities”, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Deputy General Director – Chief Designer of NIB,  
e-mail: lyudmila.cyganskaya@nvc-vagon.ru

*Г. И. Гаджиметов, И. Е. Ильин, Д. С. Курдинов, А. В. Трифонов*

## **ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ТРЕХОСНОЙ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА С ПОВЫШЕННОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СКОРОСТЬЮ**

**Аннотация.** Трехэлементные тележки, применяемые в составе грузовых вагонов действующего парка, рассчитаны на конструкционную скорость 120 км/ч. Несмотря на это, в эксплуатации допускаемая скорость поездов, сформированных из грузовых вагонов с такими тележками, значительно ниже конструкционной и не превышают 90 км/ч. Одной из причин этого являются низкие динамические качества, проявляемые в эксплуатации. Ускорение доставки контейнерных грузов потребовало разработки тележки как составной части грузового вагона с конструкционной скоростью, повышенной до 140 км/ч. В связи с этим, были проведены теоретические исследования по выбору параметров рессорного подвешивания. Для подтверждения результатов теоретических исследований проведены натурные испытания железнодорожной платформы с трехосными тележками на скоростном испытательном полигоне Белореченская – Майкоп. Результаты ходовых испытаний подтверждают соответствие динамических показателей платформы и тележки требованиям нормативных документов во всем скоростном диапазоне вплоть до конструкционной скорости.

**Ключевые слова:** трехосная тележка, грузовой вагон, конструкционная скорость, безопасность движения, динамические качества.

**Для цитирования:** Выбор параметров рессорного подвешивания трехосной тележки грузового вагона с повышенной конструкционной скоростью / Г. И. Гаджиметов, И. Е. Ильин, Д. С. Курдинов, А. В. Трифонов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 90–101. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_90.

### **Введение**

Основной объем грузовых перевозок на сети ОАО «РЖД» выполняется с применением грузовых вагонов на трехэлементных тележках с конструкционной скоростью 120 км/ч, изготовленных в соответствии с требованиями ГОСТ 9246-2013 [1]. Вместе с тем максимальная скорость движения грузовых поездов в эксплуатации ограничена скоростью 90 км/ч (80 км/ч в порожнем состоянии) [2, 3]. Одной из причин этого является несовершенство конструкции трехэлементной тележки, связанное с изменением упруго-диссипативных связей в трехэлементных тележках в процессе эксплуатации и приводящее к ухудшению динамических качеств и нарушению безопасности движения [4, 5]. Для решения этой проблемы проводились многочисленные исследования и, затем, модернизации трехэлементных тележек [6–9]. Как показали исследования, при скоростях движения свыше 100 км/ч значительно увеличивается интенсивность извилистого движения тележек, что вызывает рост динамических сил взаимодействия колес с рельсами и усиление боковых колебаний кузова [10]. Повышение интенсивности вертикальных и горизонтальных колебаний негативно влияет на устойчивость движения тележки и вагона. Таким образом, требуется максимально снизить уровень колебаний путем применения технических решений, обеспечивающих реализацию рациональных уровней упруго-диссипативных связей. В связи с этим для повышения конструкционной скорости требовалось провести комплекс теоретических и экспериментальных исследований для выбора рациональных параметров рессорного подвешивания, позволяющих обеспечивать безопасность движения на скоростях более 90 км/ч.

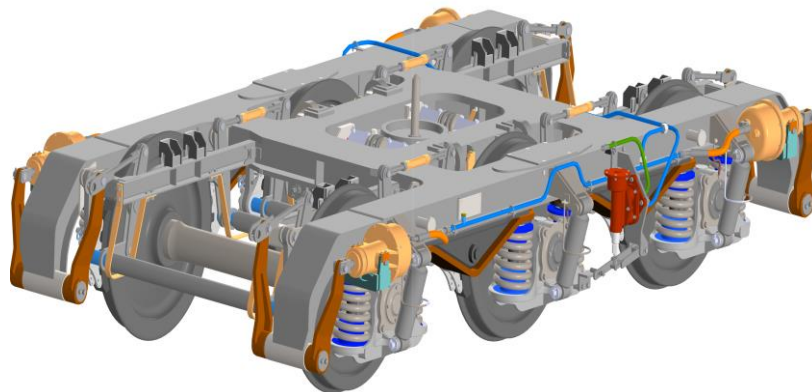
При проектировании рессорного подвешивания тележек грузовых вагонов следует учитывать следующие особенности:

- работа в диапазоне нагрузок от порожнего («тара») до груженого режима («брутто»);
- обеспечение сцепляемости вагонов в поезде при любой загрузке, в т.ч. с учетом эксплуатационных износов;
- компоновка – рессорный комплект, обеспечивающий необходимый статический прогиб в режимах «тара» и «брутто» для получения удовлетворительных ходовых качеств.

Применение в рессорном подвешивании пружинных комплектов с билинейной или кусочно-линейной характеристикой жесткости позволяет учитывать перечисленные особенности, чтобы обеспечить повышенные статические прогибы и удовлетворительные ходовые качества.

**Техническое решение трехосной тележки для грузового вагона с повышенной конструкционной скоростью**

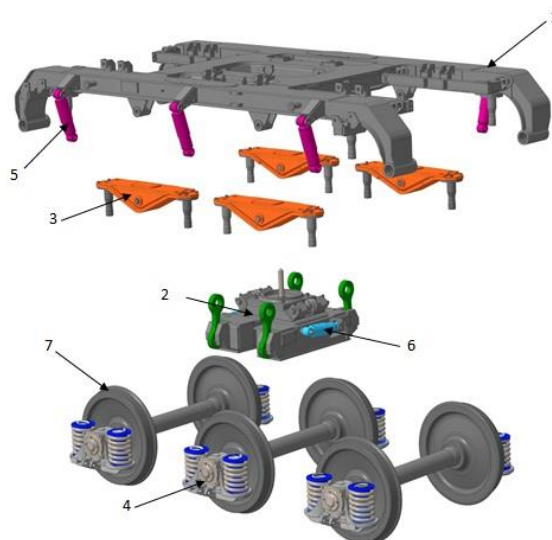
Анализ проведенных исследований и известных конструкций тележек вагонов [6–11] позволил разработать трехосную тележку модели 18-6731 для грузовых вагонов с максимальной статической нагрузкой от колесной пары на рельсы 196,2 кН (20 тс), рассчитанную на конструкционную скорость 140 км/ч (рис. 1) [12].



**Рис. 1. Общий вид трехосной тележки модели 18-6731**

Трехосная тележка состоит из следующих основных элементов (рис. 2):

- рама тележки 1;
- шкворневой брус 2 с подвесками люлечного подвешивания;
- четыре продольных балансира 3;
- буксовое рессорное подвешивание 4;
- шесть гидравлических демпферов вертикальных колебаний рессорного подвешивания 5 и два гидравлических демпфера горизонтальных колебаний люлечного подвешивания 6;
- три колесных пары, оборудованные буксовыми подшипниковыми узлами 7.



**Рис. 2. Составные элементы трехосной тележки модели 18-6731**

Рама тележки представляет собой единую цельносварную конструкцию коробчатого сечения, имеющую в своем составе кронштейны для крепления вертикальных и горизонтальных гидравлических демпферов гашения колебаний для присоединения продольных балансиров, подвесок люлечного подвешивания, элементов тормозной передачи.

Шкворневой брус предназначен для передачи нагрузок от рамы вагона на раму тележки. Нагрузка передается через подвески люлечного подвешивания, установленные под наклоном относительно вертикальной оси. Люлечное подвешивание обеспечивает подвижную (упругую) связь рамы платформы с рамой тележки. Наклонная установка подвесок позволяет при прохождении платформой кривых участков пути не нарушать габаритные ограничения за счет поворота рамы

платформы с грузом в сторону, противоположную действию центробежного ускорения. К шкворневому брусу приварены кронштейны для крепления горизонтальных гидравлических демпферов поперечных колебаний отбоя относительно рамы тележки.

Продольные балансиры передают нагрузку от рамы тележки на пружины рессорного подвешивания, они позволяют выравнивать вертикальные нагрузки между колесами колесных пар при прохождении неровностей пути. На продольных балансирах закреплены шпинтоны, являющиеся направляющими для пружинного комплекта буксового рессорного подвешивания тележек, передающие горизонтальные нагрузки на буксовые узлы колесных пар.

В тележке применено одноступенчатое буксовое рессорное подвешивание, которое расположено между корпусом буксы и опорными поверхностями рамы тележки и продольных балансиров. Пружины буксового рессорного подвешивания опираются на кронштейны («крылья») корпуса буксы.

Особенностью рессорного подвешивания грузовых вагонов является их работа в режимах различной загрузки вагона: от порожнего состояния (масса тары) до полной грузоподъемности (масса брутто). При этом важно иметь необходимый статический прогиб рессорного подвешивания, который обеспечил бы необходимый уровень динамических качеств и воздействия на путь. При определении рациональных характеристик рессорного подвешивания необходимым условием является обеспечение в эксплуатации разности уровней автосцепок сцепляемых вагонов не более 110 мм [2]. Этому состоянию соответствует сцепление груженого вагона с максимально обточенными колесами (диаметром  $D_{\min}$  по кругу катания) с порожним вагоном с новыми колесами (диаметром  $D_{\max}$  по кругу катания) (рис. 3).

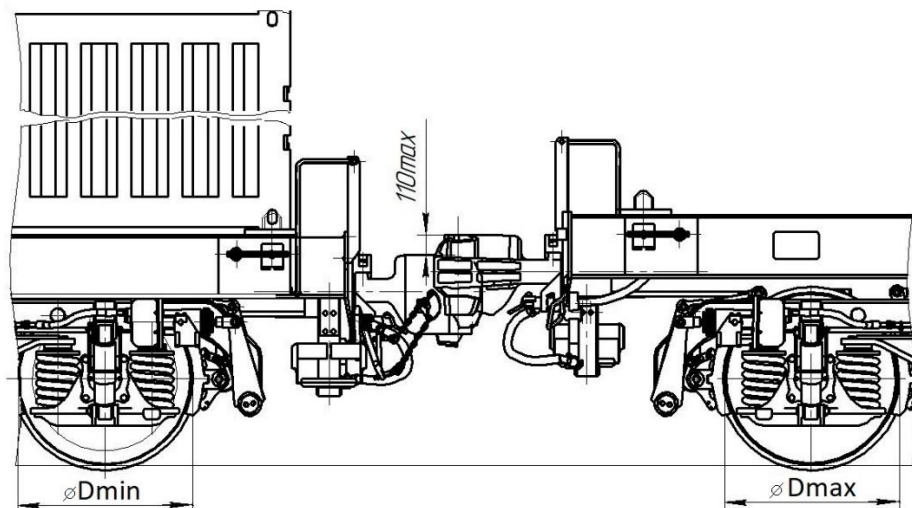


Рис. 3. Разность уровня автосцепок сцепленных вагонов

Для реализации этого условия в эксплуатируемых грузовых вагонах с тележками по ГОСТ 9246-2013 разность полных статических прогибов рессорного подвешивания тележки в вагонах с максимальной и минимальной расчетной массой нормируется в диапазоне не более 55 мм, при этом надо отметить, что в эксплуатации допустимая минимальная толщина обода колеса грузового вагона составляет не менее 22 мм [13]. Для грузовых вагонов с повышенной до 140 км/ч конструкционной скоростью это значение пока не установлено. Вместе с тем инструкция по ремонту колесных пар пассажирских вагонов допускает минимальное значение толщины обода колеса не менее 35 мм при скорости движения поезда свыше 120 км/ч, но не более 140 км/ч, что позволяет при проектировании тележки с повышенной конструкционной скоростью до 140 км/ч реализовать разность полных статических прогибов рессорного подвешивания тележки в вагонах с максимальной и минимальной расчетной массой в пределах не более 68 вместо 55 мм [14].

Исходя из этих данных, спроектирован комплект буксовых пружин рессорного подвешивания трехосной тележки модели 18-6731 (рис. 4), состоящий из основной наружной пружины 1 и дополнительной внутренней пружины 2, разделенных втулкой 3, позволяющий реализовать билинейную силовую характеристику  $F(s)$  (рис. 4).

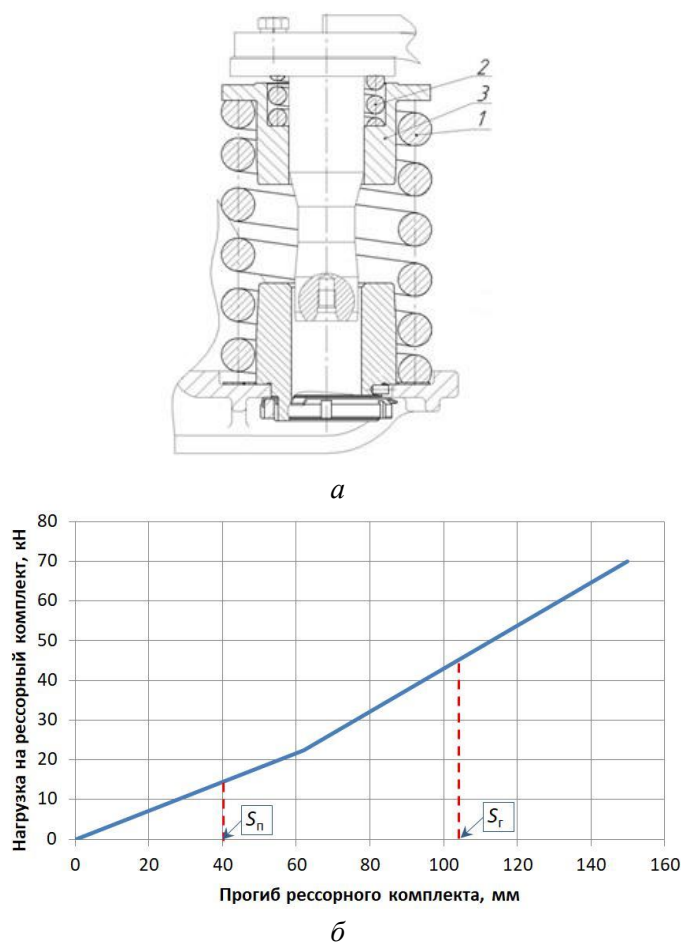


Рис. 4. Комплект пружин буксового рессорного подвешивания (а) и его расчетная силовая характеристика (б):

$S_n$  – статический прогиб рессорного комплекта в порожнем режиме;

$S_r$  – статический прогиб рессорного комплекта в груженом режиме

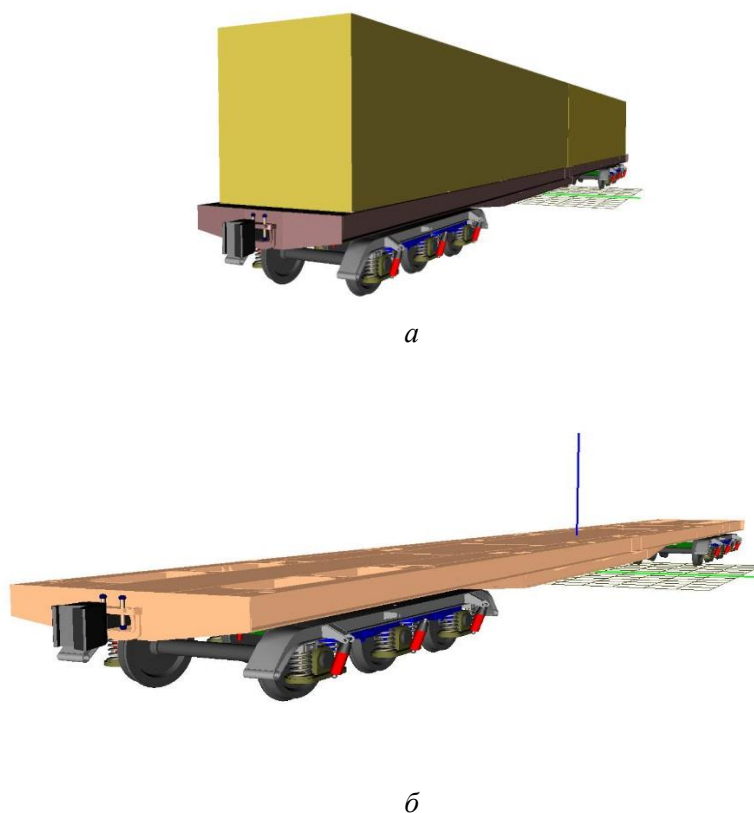
#### *Теоретические исследования (компьютерное моделирование) для выбора параметров рессорного подвешивания*

Теоретические исследования по выбору параметров рессорного подвешивания проводились по программе, предусматривающей последовательность действий согласно схеме (алгоритму), приведенной на рис. 5.

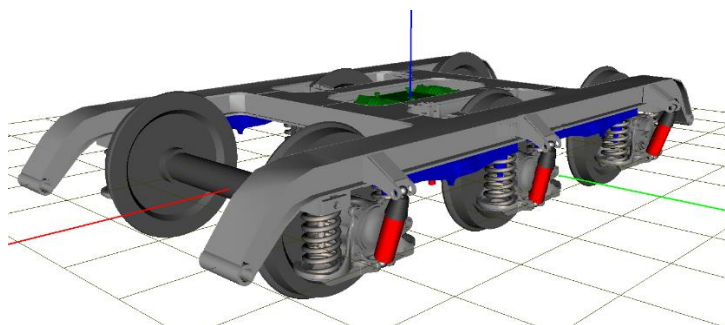


Рис. 5. Алгоритм проведения (иерархическая схема) исследований по выбору параметров рессорного подвешивания

Для исследования динамических процессов, происходящих при движении по железнодорожному пути в программном комплексе «Универсальный механизм», была разработана динамическая модель платформы (в порожнем и груженом состояниях) (рис. 6) с двумя трехосными тележками модели 18-6731 (рис. 7).



**Рис. 6. Общий вид платформы в динамической модели:**  
*a* – в груженом состоянии, *б* – в порожнем состоянии



**Рис. 7. Общий вид трехосной тележки в динамической модели**

Динамическая модель платформы состояла из подсистем двух уровней. Подсистема первого уровня «Платформа» состоит из рамы платформы и подсистемы второго уровня «Тележка».

Модель состояла из системы твердых тел, соединенных между собой совокупностью связей, ограничивающих их перемещения относительно друг друга. Модель трехосной тележки состояла из абсолютно твердых тел, таких как: рама тележки, шкворневой брус, четыре подвески люлечного подвешивания, четыре продольных балансира, шесть колесных пар и связей, описывающих их взаимодействие между собой.

Для оценки адекватности модели была выполнена верификация путем сравнения результатов моделирования с натурными испытаниями.

На основании проведенных теоретических исследований с применением разработанной динамической модели были выбраны следующие параметры рессорного подвешивания:

- статический прогиб под вагоном в порожнем состоянии;
- статический прогиб рессорного подвешивания под вагоном в груженом состоянии;

– коэффициент относительного демпфирования колебаний рессорного подвешивания.

Минимальное значение коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельса, рассчитанное при одновременном действии вертикальных и горизонтальных сил в контакте колеса с рельсом, зарегистрировано при движении порожней платформы по прямому участку пути с конструкционной скоростью 140 км/ч и составило 1,4 (при нормативном значении – не менее 1,3). Результаты расчета имеют удовлетворительную сходимость с натурными испытаниями. Проведенные расчеты подтвердили устойчивость трехосной тележки модели 18-6731 в части обеспечения конструкционной скорости платформы 140 км/ч.

#### *Экспериментальные исследования*

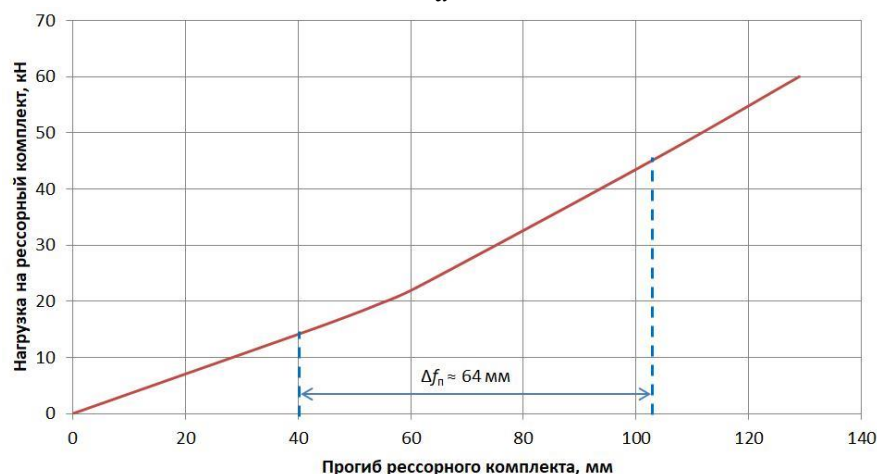
Для определения силовой характеристики комплекта пружин рессорного подвешивания была проведена их тарировка на стенде, позволяющем регистрировать величину сжатия (упругую деформацию) в зависимости от прикладываемой силы (рис. 8).

Расчетные статические прогибы для порожнего и груженого до полной грузоподъемности состояний платформы определялись в соответствии с методикой, указанной в ГОСТ 9246-2013, по зависимости упругой деформации от силы, воспринимаемой рессорным комплектом в соответствующем режиме.

Разность полных статических прогибов в груженом и порожнем состояниях ( $\Delta f_n$ ) обеспечивала условие для сцепления автосцепных устройств (разность не более 68 мм).



*а*

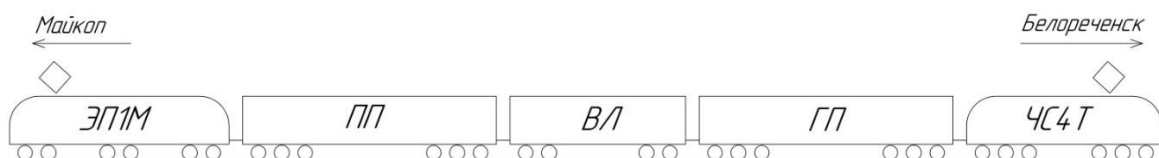


*б*

**Рис. 8. Тарировка рессорного комплекта:**

*а* – общий вид установки на стенде, *б* – график зависимости полного статического прогиба от нагрузки

Для проведения ходовых испытаний был сформирован опытный поезд (рис. 9) в составе двух 6-осных электровозов (ЭП1М и ЧС4Т с конструкционной скоростью 140 и 160 км/ч соответственно), вагона-лаборатории (на базе пассажирского вагона с тележками КВЗ-ЦНИИ) и двух испытуемых платформ модели 13-6704 (с тележками модели 18-6731) (одна в порожнем состоянии, другая – в груженом). Испытания проводились по методам, установленным в ГОСТ 33788-2016 и ГОСТ 34759-2021.



**Рис. 9. Схема опытного поезда для проведения ходовых испытаний:**

ПП – порожняя платформа, ГП – груженная платформа, ВЛ – вагон-лаборатория

Общий вид порожней и груженной платформ в составе опытного поезда показан на рис. 10.



*а*



*б*

**Рис. 10. Общий вид платформ в составе опытного поезда:**

*а* – порожняя, *б* – груженная

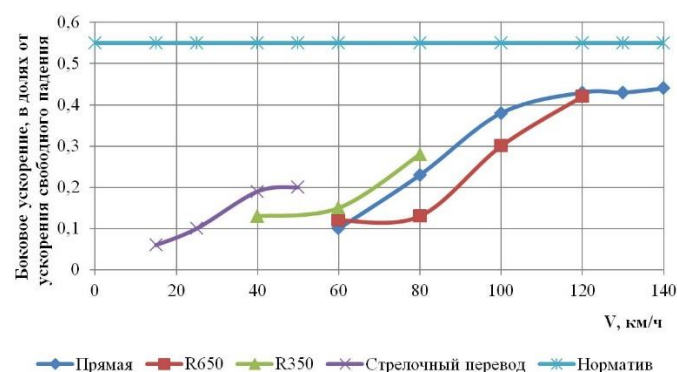
Опытные поездки осуществлялись в челночном режиме. При этом на прямом участке пути поездки осуществлялись со скоростями движения до 140 км/ч; в кривых радиусом 650 и 350 м – до скоростей 120 и 80 км/ч соответственно; в стрелочных переводах по боковому направлению с крестовиной марки 1/11 – до скорости 50 км/ч. Скорости движения при проведении опытных поездок устанавливались в прямом участке пути поэтапно, повышаясь от начального до максимальных значений, при движении в измерительных круговых кривых – до значений, соответствующих наибольшей расчетной величине непогашенного ускорения (0,64–0,80 м/с<sup>2</sup>). Результаты испытаний представлены на рис. 11–13.

Анализ результатов испытаний по показателю «Максимальное боковое ускорение обрессоренных частей» (рис. 11) показывает соответствие полученных значений требованиям ГОСТ 33211-2014. При движении платформы в порожнем и груженом режимах по круговым кривым с наибольшими реализованными непогашенными ускорениями, в прямом участке пути со скоростями до 140 км/ч, а также на ответвленном направлении измерительного стрелочного перевода (со скоростью 50 км/ч) значения показателей не превышали нормативных значений. Максимальное значение показателя получено при движении в порожнем и груженом режиме в прямом участке пути со скоростью 140 км/ч.

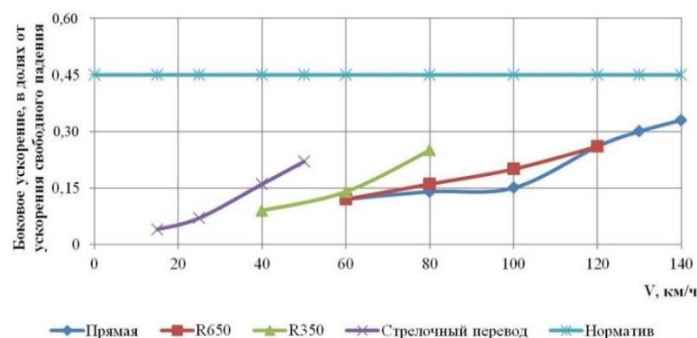
Максимальные вертикальные ускорения обрессоренных частей платформы зарегистрированы при движении в прямом участке пути при скорости 140 км/ч (рис. 12). Наибольшие значения не превышают нормативных требований при всех режимах испытаний.

Наименьшая величина коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельса 1,42 (при нормативном значении не менее 1,30) (рис. 13) зарегистрирована при движении порожней платформы

по прямому участку пути с конструкционной скоростью 140 км/ч, что свидетельствует о достаточной устойчивости движения платформы во всем диапазоне скоростей вплоть до конструкционной.



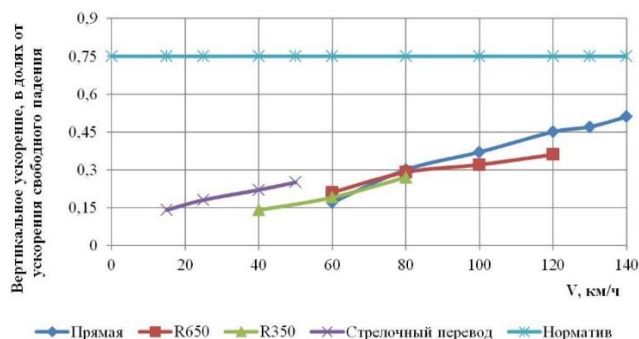
а



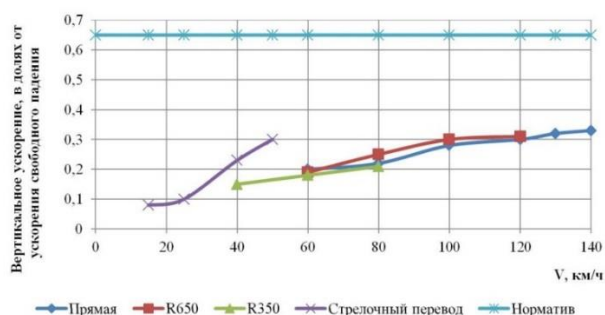
б

**Рис. 11. Уровни максимальных боковых ускорений обрессоренных частей:**

а – порожней платформы; б – груженой платформы



а



б

**Рис. 12. Уровни вертикальных ускорений обрессоренных частей:**

а – порожней платформы; б – груженой платформы

Одним из основных показателей для оценки безопасности движения железнодорожного подвижного состава по рельсовой колее является «Коэффициент запаса устойчивости колеса от схода с рельса».

Минимальное значение данного показателя в ходе испытаний определялось по текущим зарегистрированным значениям динамических процессов с вероятностью 0,0015 согласно ГОСТ 33788-2016.

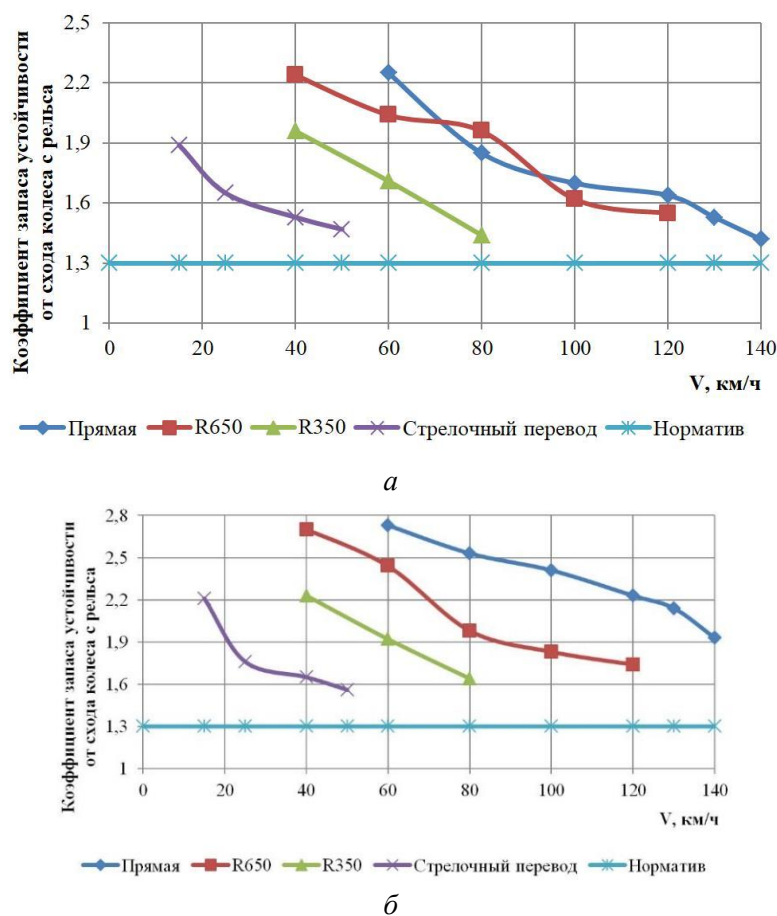


Рис. 13. Коэффициент запаса устойчивости колесной пары от схода с рельсов:  
а – порожней платформы, б – груженой платформы

### Выводы

Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований упруго-диссипативных связей в рессорном подвешивании трехосной тележки с повышенной конструкционной скоростью позволил:

- выбрать рациональные параметры рессорного подвешивания;
- разработать тележку, обеспечивающую приемлемые уровни динамических качеств и безопасное движение грузового вагона со скоростями до 140 км/ч;
- реализовать сцепляемость грузовых вагонов в поезде при повышенных расчетных статических прогибах рессорного подвешивания.

### Список литературы

1 ГОСТ 9246-2013. Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации по переписке от 27 сентября 2013 г. № 59-П. – Москва : Стандартиформ, 2013. – 37 с. – URL: [reglament.by/wp-content/uploads/docs/gost/GOST-9246-2013.pdf?ysclid=mnecr5lswj256224149](http://reglament.by/wp-content/uploads/docs/gost/GOST-9246-2013.pdf?ysclid=mnecr5lswj256224149) (дата обращения: 18.02.2026).

### References

1 GOST 9246-2013. Two-axle three-element bogies of freight wagons of 1520 mm gauge railways. General specifications : national standard of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification by correspondence dated September 27, 2013, No. 59-P. – Moscow : Standartinform, 2013. – 37 p. – URL: [reglament.by/wp-content/uploads/docs/gost/GOST-9246-2013.pdf?ysclid=mnecr5lswj256224149](http://reglament.by/wp-content/uploads/docs/gost/GOST-9246-2013.pdf?ysclid=mnecr5lswj256224149) (date of access: 18.02.2026).

2 Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утверждены приказом Министерства транспорта Российской Федерации № 286 от 21.12.2010. – URL: [mintrans.gov.ru/documents/6/1349?ysclid=mnesui009n365783230](http://mintrans.gov.ru/documents/6/1349?ysclid=mnesui009n365783230) (дата обращения: 18.02.2026).

3 Нормы допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм: утверждены распоряжением ОАО «РЖД» № 2240р от 08.11.2016. – URL: [scbist.com/scb/uploaded/1\\_1709287590.pdf?ysclid=mned114x9e522766323](http://scbist.com/scb/uploaded/1_1709287590.pdf?ysclid=mned114x9e522766323) (дата обращения: 18.02.2026).

4 О допускаемых скоростях движения порожних грузовых вагонов на тележках модели 18-100 / А. М. Бржезовский, О. А. Краснобаев, А. В. Спилов, И. Е. Ильин // Вестник ВНИИЖТ. – № 2. – Москва, 2021. – С. 65–75. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-2-65-75.

5 **Ромен, Ю. С.** Устойчивость движения вагонов на тележках 18-100 / Ю. С. Ромен // Вестник ВНИИЖТ. – № 3. – Москва, 2019. – С. 149–154. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-3-149-154.

6 **Анисимов, П. С.** К вопросу улучшения динамических качеств тележки ЦНИИ-Х3-О / П. С. Анисимов // Вопросы проектирования и ремонта большегрузных вагонов: межвузовский сборник научных трудов / под редакцией В. Н. Котуранова; МИИТ. – Москва, 1981. – Вып. 679. – С. 26–41.

7 Модернизация тележек грузовых вагонов / М. Ф. Вериго, В. А. Лазарян, Л. О. Грачева, П. С. Анисимов. – Железнодорожный транспорт. – 1966. – № 4. – С. 38–41.

8 **Ушкалов, В. Ф.** Модернизация тележек грузовых вагонов как вариант обновления ходовых частей грузового подвижного состава / В. Ф. Ушкалов, А. Д. Лашко, Т. Ф. Мокрий. – Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – № 5. – С. 8–15. – ISSN 2223-9731.

9 **Вершинский, С. В.** Исследования динамических качеств порожних грузовых вагонов / С. В. Вершинский, В. М. Кондрашев. – Москва: Сборник ВНИИЖТ, 1976. – № 548. – С. 58–74.

10 **Долматов, А. А.** Динамика и основные технические требования к конструкции ходовых частей пассажирских вагонов для скорости движения до 160 км/ч. – Москва: Транспорт, 1965. – № 307. – С. 121–137.

11 Скоростная платформа для перевозки контейнеров / В. А. Никонов, Ю. В. Мещерин, М. А. Кимасов [и др.]. – Вагоны и вагонное хозяйство. – 2017. – № 2. – С. 25–27. – ISSN 1817-6089.

2 Rules for the technical operation of railways of the Russian Federation. Approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 286 dated 21.12.2010. – URL: [mintrans.gov.ru/documents/6/1349?ysclid=mnesui009n365783230](http://mintrans.gov.ru/documents/6/1349?ysclid=mnesui009n365783230) (date of access: 18.02.2026).

3 Standards for permissible speeds of rolling stock on 1520 (1524) mm gauge railway tracks. Approved by Order of JSC “Russian Railways” No. 2240r dated 08.11.2016. – URL: [scbist.com/scb/uploaded/1\\_1709287590.pdf?ysclid=mned114x9e522766323](http://scbist.com/scb/uploaded/1_1709287590.pdf?ysclid=mned114x9e522766323) (date of access: 18.02.2026).

4 About permissible speeds of empty freight wagons on bogies of model 18-100 / A. M. Brzhezovsky, O. A. Krasnobayev, A. V. Spirov, I. E. Ilyin // Russian Railway Science Journal. – No. 2. – Moscow, 2021. – P. 65–75. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-2-65-75.

5 **Romen, Yu. S.** Stability of wagon movement on 18-100 bogies / Yu. S. Romen // Russian Railway Science Journal. – No. 3. – Moscow, 2019. – P. 149–154. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-3-149-154.

6 **Anisimov, P. S.** On the issue of improving the dynamic qualities of TsNII-Kh3-O bogie / P. S. Anisimov // Issues of design and repair of heavy-duty wagons: interuniversity collection of scientific papers / edited by V. N. Koturanov; MIIT. – Moscow, 1981. – Issue. 679. – P. 26–41.

7 Modernization of freight wagon bogies / M. F. Verigo, V. A. Lazaryan, L. O. Gracheva, P. S. Anisimov. – Railway transport. – 1966. – No. 4. – P. 38–41.

8 **Ushkalov, V. F.** Modernization of freight wagon bogies as an option for updating the freight rolling stock running gear / V. F. Ushkalov, A. D. Lashko, T. F. Mokriy // Russian Railway Science Journal. – 2013. – No. 5. – P. 8–15. – ISSN 2223-9731.

9 **Vershinsky, S. V.** Research of dynamic qualities of empty freight wagons / S. V. Vershinsky, V. M. Kondrashev. – Moscow: Collection of the Russian Railway Science Journal, 1976. – No. 548. – P. 58–74.

10 **Dolmatov, A. A.** Dynamics and main technical requirements for the design of passenger car running gear for speeds up to 160 km/h. – Moscow: Transport, 1965. – No. 307. – P. 121–137.

11 High-speed flat-wagon for transporting containers / V. A. Nikonov, Yu. V. Meshcherin, M. A. Kimasov [et al.]. – Wagons and Wagon Facilities. – 2017. – No. 2. – P. 25–27. – ISSN 1817-6089.

12 Скоростной вагон-платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров модели 13-6704 : особенности конструкции и перспективы применения. В. С. Коссов, В. А. Никонов, А. М. Шевцов [и др.]. – Вестник ИПЕМ. Техника железных дорог. – 2021. – № 3. – С. 30–34. – ISSN 1998-9318.

13 Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм № РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017 (утв. на 67-м заседании Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества от 19-20.10.2017). – URL: docs.cntd.ru/document/550948959?ysclid=mned2x6qpw496378515 (дата обращения: 18.02.2026).

14 Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами пассажирских вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм (утв. на 63-м заседании Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества от 04–05.11.2015). – URL: docs.cntd.ru/document/550948959?ysclid=mned4zzy9x934064620 (дата обращения: 18.02.2026).

12 High-speed flat-wagon for transporting large-capacity containers of model 13-6704 : design features and application prospects. V. S. Kossov, V. A. Nikonov, A. M. Shevtsov [et al.] // IPEM Journal. Railway Equipment. – 2021. – No. 3. – P. 30–34. – ISSN 1998-9318.

13 Regulatory document on the repair and maintenance of wheel sets with axlebox units of freight wagons of 1520 (1524) mm gauge main-line railways No. RD VNIIZhT 27.05.01-2017 (approved at the 67th meeting of the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States on 19-20.10.2017). – URL: docs.cntd.ru/document/550948959?ysclid=mned2x6qpw496378515 (date of access: 18.02.2026).

14 Regulatory document on the repair and maintenance of wheel sets with axlebox units of passenger cars of 1520 (1524) mm gauge main-line railways (approved at the 63rd meeting of the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States on 04–05.11.2015). – URL: docs.cntd.ru/document/550948959?ysclid=mned4zzy9x934064620 (date of access: 18.02.2026).

*G. I. Gadzhimetov, I. E. Ilyin, D. S. Kurdikov, A. V. Trifonov*

#### SELECTION OF PARAMETERS FOR THE SPRING SUSPENSION OF A THREE-AXLE FREIGHT CAR BOGIE WITH INCREASED DESIGN SPEED

**Abstract.** Three-element bogies used in freight cars of the existing fleet are designed for an operation speed of 120 km/h. Despite this, in operation the permissible speed of trains formed from freight cars with such bogies is significantly lower than the design speed and does not exceed 90 km/h. One of the reasons for this is the poor dynamic performance demonstrated during operation. Speeding up the delivery of bulk cargo required the development of a bogie as an integral part of a freight car with a design speed increased to 140 km/h. In this regard, theoretical studies were conducted on the selection of spring suspension parameters. To confirm the results of theoretical studies, full-scale tests of a railway platform with three-axle bogies were conducted at the Belorechenskaya-Maikop high-speed test site. The results of the running tests confirm that the dynamic performance of the platform and the bogie meets the requirements of regulatory documents across the entire speed range, up to the design speed.

**Keywords:** three-axle bogie, freight car, design speed, safety of operation, dynamic performance.

**For citation:** Selection of parameters for the spring suspension of a three-axle freight car bogie with increased design speed / G. I. Gadzhimetov, I. E. Ilyin, D. S. Kurdikov, A. V. Trifonov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 90–101. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_90.

#### Сведения об авторах

**Гаджиметов Гаджимет Исамединович**  
Акционерное общество  
«Научно-исследовательский и  
конструкторско-технологический институт

#### Information about the authors

**Gadzhimetov Gadzhimet Isamedinovich**  
Joint Stock Company “Scientific-Research and  
Design-Technology Institute of Rolling Stock”  
(JSC “VNIKTI”),

подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»),  
руководитель испытательного центра,  
e-mail: gajimetov-gi@vnikti.com

**Ильин Илья Евгеньевич**

Акционерное общество  
«Научно-исследовательский и  
конструкторско-технологический институт  
подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»),  
заведующий лабораторией динамики  
экипажных частей подвижного состава,  
e-mail: ilyin-ie@vnikti.com

**Курди́ков Дмитрий Сергеевич**

Акционерное общество  
«Научно-исследовательский и  
конструкторско-технологический институт  
подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»),  
главный специалист отдела динамики,  
e-mail: kurdikov-ds@vnikti.com

**Трифонов Алексей Валерьевич**

Акционерное общество  
«Научно-исследовательский и  
конструкторско-технологический институт  
подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»),  
кандидат технических наук,  
заместитель заведующего отделом,  
e-mail: trifonov-av@vnikti.com

Head of the Test Center,  
e-mail: gajimetov-gi@vnikti.com

**Ilyin Ilya Evgenyevich**

Joint Stock Company “Scientific-Research and  
Design-Technology Institute of Rolling Stock”  
(JSC “VNIKTI”),  
Head of the Laboratory of Rolling Stock  
Running Gear Dynamics,  
e-mail: ilyin-ie@vnikti.com

**Kurdikov Dmitry Sergeevich**

Joint Stock Company “Scientific-Research and  
Design-Technology Institute of Rolling Stock”  
(JSC “VNIKTI”),  
Chief Specialist of the Dynamics Department,  
e-mail: kurdikov-ds@vnikti.com

**Trifonov Aleksey Valeryevich**

Joint Stock Company “Scientific-Research and  
Design-Technology Institute of Rolling Stock”  
(JSC “VNIKTI”),  
Candidate of Engineering Sciences,  
Deputy Head of Department,  
e-mail: trifonov-av@vnikti.com

*Р. В. Гучинский*

## СНИЖЕНИЕ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ РАМЫ КУЗОВА МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Аннотация.** Повышение конструкционных скоростей современного подвижного состава неизбежно связано со снижением его массы. Оптимизация рамы является целесообразной из-за ее наибольшего удельного веса в составе кузова вагона. Рассматриваются варианты конструктивных схем рамы, позволяющие снизить массу по сравнению с классической раскосной схемой для моторвагонного подвижного состава. Показано, что для передачи нагрузок от сцепного устройства на обвязочный профиль подходящей является схема, объединяющая хребтовую балку с раскосами в единые длинные раскосы. Получено, что наиболее эффективной с точки зрения передачи продольных усилий является безраскосная схема с единой хребтовой балкой по всей длине кузова, при этом для уменьшения металлоемкости возможно ее существенное ослабление в центральной части кузова. Схема с хребтовой балкой для рассматриваемой конструкции позволяет сократить массу рамы на 11 %, уменьшить в 2 раза сечение обвязочного профиля, при этом прогиб от собственного веса увеличивается на 9 %. Такая схема позволяет сохранить шкворневое соединение тележки и кузова, типичное для электропоездов.

**Ключевые слова:** прочность, жесткость, электропоезд, метод конечных элементов, оптимизация, кузов, динамика вагона.

**Для цитирования:** Гучинский, Р. В. Снижение металлоемкости рамы кузова моторвагонного подвижного состава / Р. В. Гучинский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 102–109. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_102.

### **Введение**

Снижение массы кузовов вагонов остается актуальной задачей в последние десятилетия. Масса является критически важным параметром при проектировании высокоскоростного подвижного состава, т.к. от нее зависит энергопотребление при тяге и торможении, износ ходовой части и инфраструктуры, динамика движения и плавность хода. При этом массы различных частей подвижного состава взаимозависимы, например, более массивному кузову должна соответствовать по прочности и жесткости более массивная тележка, крепления букс и тормозных кронштейнов.

Кузов вагона является наиболее металлоемким, поэтому в первую очередь может быть рассмотрен в целях оптимизации. Оптимизация тележек более трудоемка с точки зрения обеспечения необходимых ходовых качеств и безопасности движения. Тем не менее получают распространение рамы тележек из композитных материалов [1, 2]. Масса кузова существенно влияет на его жесткость и частоту собственных изгибных колебаний, значение которой является нормируемым показателем динамических качеств [3–5].

Кузов вагона обычно представляет собой замкнутую цельнометаллическую оболочку, подкрепленную продольными стрингерами и шпангоутами. Кузов состоит из рамы, боковых и торцевых стен, а также крыши.

Для кузовов из алюминиевых экструдированных панелей существенное снижение массы может быть достигнуто за счет топологической оптимизации, в том числе изменения формы поперечного сечения кузова [6]. При подборе материала эффективность по снижению веса может превышать 30 % для верхней части кузова [7]. Оптимизация обычно проводится по целевым функциям напряженно-деформированного состояния. Наиболее простой способ оптимизации - вариация толщин элементов [8]. Помимо алюминиевых в конструкции кузова могут использоваться и магниевые сплавы, что также эффективно с точки зрения повышения жесткости или снижения массы [9].

Рама является наиболее массивным элементом конструкции кузова, т.к. воспринимает основную часть потока сжимающих усилий, возникающих при тяге, торможении и ударах от столкновений. Масса рамы в случае моторвагонного подвижного состава (МВПС) составляет около половины массы кузова, поэтому ее снижение является наиболее эффективным. Боковые стены существенно влияют на сдвиговую жесткость кузова, что отражается на его общей жесткости, и также могут быть оптимизированы.

Торцевые стены менее всего нагружены при эксплуатации подвижного состава, поэтому их масса может быть максимально снижена. Критическими элементами торцевых стен являются стойки дверного

проема, сечение которых необходимо поддерживать на уровне, препятствующем телескопированию вагонов при столкновении, что обеспечивается требованием к их моменту сопротивления [10]. Также с помощью ребер жесткости должна быть обеспечена устойчивость обшивки торцевых стен.

Крыша кузова может также поддаваться оптимизации в случае конструкций из композитных материалов. В работе [11] масса кузова за счет крыши была снижена на 7 % при сохранении жесткостных характеристик.

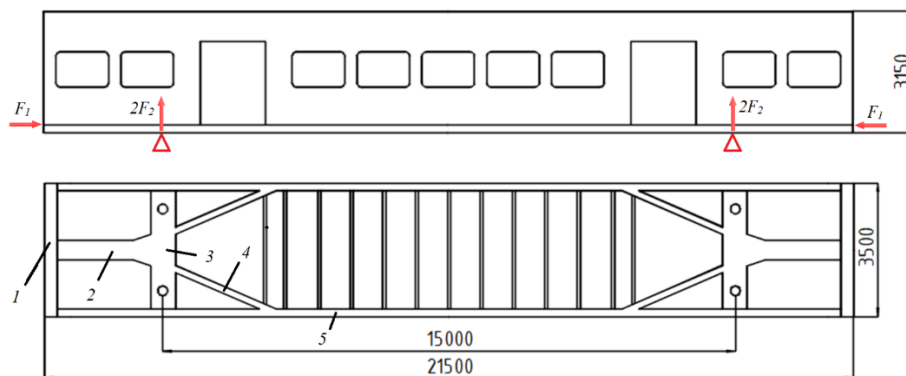
Однако для стальных кузовов крыша является наименее перспективной с точки зрения снижения массы, так как состоит из минимально необходимых поперечных балок, обеспечивающих ее локальную жесткость, и гофрированного настила. Сечение поперечных балок крыши может быть выбрано минимальным исходя из прочности и жесткости при воздействии крышевого оборудования и технологических особенностей. Прочие нагрузки на крышу, например, вес потолков и электрооборудования чердаков, как правило, малы. Количество поперечных балок обычно определяется расположением оконных и дверных проемов, а также местной устойчивостью, и не может быть сокращено.

В целом оптимизация конструкции кузова является комплексной задачей, в которой при обеспечении прочности, жесткости и устойчивости конструкций [12, 13] должны учитываться требования технологичности, возможности сервисного обслуживания и т. д.

Цель работы состоит в разработке эффективной конструкции рамы стального кузова вагона электропоезда, которая обеспечивают его минимальную массу.

### Конструкция рамы кузова

Типичная конструкция рамы кузова МВПС приведена на рис. 1. Буферный брус рамы может быть частично упразднен, т.к. продольные воздействия на кузов воспринимаются сцепным устройством и поглощающим аппаратом, а буфера, как правило, отсутствуют. Исключением может быть передняя консоль головного вагона, на которую в ряде случаев на буферный брус устанавливают крэш-элементы. Продольные усилия от сцепного устройства передаются на хребтовую балку, затем через раскосы на обвязку. Нормативные усилия соударения  $F_1$  для вагонов метрополитена составляют 0,9 МН [14], поэтому раскосы в таких кузовах упраздняются. Для вагонов МВПС усилия составляют 2–2,5 МН, поэтому при отсутствии раскосов в соединении шкворневой балки с хребтовой балкой и обвязочным профилем возникают превышения напряжений. Конструкция рам, приведенная на рис. 1, типична для большинства электропоездов серий ЭТ и ЭД, спроектированных на основании кузовов серии ЭР [15].

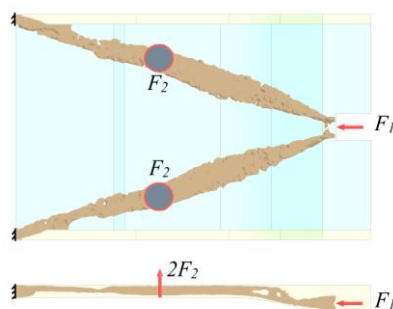


**Рис. 1. Общий вид кузова вагона МВПС:**

1 – буферный брус, 2 – сокращенная хребтовая балка, 3 – шкворневая балка, 4 – раскос,  
5 – обвязочный профиль

Тем не менее подобная конструкция не обладает максимальной эффективностью при передаче продольных усилий от сцепного устройства на обвязочные профили. В точках стыков шкворневой балки с хребтовой и раскосами (рис. 2) происходит поворот потока усилий и, как следствие – образование концентраторов напряжений, для подавления которых приходится дополнительно усиливать конструкцию. Естественными оптимальными направлениями передачи продольных усилий от сцепного устройства к обвязочным профилям является кратчайшие линии, проходящие через точки опирания шкворневой балки на тележку. Эти направления также были получены в результате топологической оптимизации консоли рамы кузова вагона от действия сжимающей нагрузки  $F_1 = 2$  МН и нагрузок

со стороны тележки  $F_2 = 0,15$  МН для собственного веса кузова брутто 60 тонн (рис. 2). Модель содержит 144000 объемных тетраэдрических двадцатиузловых элементов и условно закрепляется по сечениям обвязочного профиля.



**Рис. 2. Оптимальные направления потока усилий при сжатии консоли**

Вторым возможным оптимальным направлением передачи усилий является продольное, предполагающее соединение сокращенных хребтовых балок в единую по всей длине кузова. Конструкции кузова с единой хребтовой балкой широко используются в кузовах грузовых и пассажирских вагонов локомотивной тяги. Однако недостатком такой конструкции является повышенная масса, поэтому рациональным направлением является снижение сечения хребтовой балки в центральной части рамы.

#### **Описание модели и нагрузок**

При проектировании кузова необходимо обеспечивать его прочность, устойчивость и жесткость от действия нормативных расчетных нагрузок. Для локомотивов и МВПС с точки зрения прочности определяющим является расчетный случай 1 – действие по поверхностям упоров сцепных устройств сжимающей нагрузки удара, для целей расчета прикладываемой квазистатически [16]. Расчетные случаи 2 и 3 предполагают проверку прочности от действия собственного веса с учетом динамики, по ним косвенно можно судить о сопротивлении кузова усталости, при этом напряжения для типовых кузовов обычно не превышают допускаемых значений. Расчетные случаи 4 (вывешивание на домкратах и подъем вагона за область сцепного устройства) соответствуют ремонтным нагрузкам и обычно требуют лишь локальных усиления в областях точек подъема. Поэтому при сертификационных испытаниях вагон подвергается соударению, остальные расчетные случаи могут проверяться на стадии предварительных динамико-прочностных испытаний [17].

Конструкции рамы сравниваются на примере одного из проектных вариантов кузова неоторного вагона электропоезда ЭП2Тв. Кузов в соответствии с расчетным случаем Ia [16] нагружается сжимающим усилием 2 МН и собственным весом кузова и пассажиров. Нагрузка от пассажиров принимается, исходя из плотности стоящих пассажиров 7 чел. на  $1 \text{ м}^2$  с учетом занятости сидячих мест. Масса оборудованного кузова с пассажирами составляет 50 т. На каждой боковой стене расположены девять оконных и два дверных проема (см. рис. 1). Кузов изготовлен из низколегированной стали 09Г2С с пределом текучести 295–345 МПа в зависимости от толщины проката. Из-за непревышения предела текучести моделируется упругое поведение материала с коэффициентом Пуассона 0,3 и модулем Юнга  $2,1 \cdot 10^5$  МПа. Допускаемые напряжения в расчетном случае Ia составляют 90 % предела текучести [16]. Обвязочный пояс имеет коробчатое сечение и состоит из двух швеллеров 20. Поперечные балки рамы выполнены из гнутого швеллера толщиной 6 мм. Шкворневая, хребтовая балки и раскосы выполнены из листового проката толщиной 8–12 мм. Настил пола выполнен из гофрированного листа толщиной 2 мм в центральной части рамы и сплошного листа толщиной 3 мм в консольных частях.

Из-за симметрии геометрии и нагрузок для упрощения рассматривается четверть кузова с наложением условий симметрии по двум плоскостям. Конечно-элементная модель четверти кузова состоит из 72000 четырехузловых элементов тонкой оболочки. Гофры металлического настила пола моделируются балочными трехузловыми элементами. В модели применяется конформная сетка, контакты не используются. Средний размер конечного элемента составляет 40 мм. Помимо граничных условий симметрии выполняется ограничение вертикальной поступательной степени свободы кольцевой области опирания кузова на пневморессору.

#### **Результаты сопоставительных расчетов и обсуждение**

Для сопоставления были рассмотрены варианты с короткими, длинными раскосами и с длинной хребтовой балкой. Конструкция торцевых, боковых стен и крыши для всех вариантов одинакова.

Описание вариантов приведено в табл. 1. На рис. 3 показано распределение полей эквивалентных напряжений рамы по энергетической теории прочности для четырех рассматриваемых вариантов конструкции рамы. В варианте 2 была ослаблена хребтовая балка, что увеличило максимальный вертикальный прогиб от собственного веса на 14 %. В варианте 3 хребтовая балка сварена из профилей и листов, при этом толщина варьируется от 4 мм в центральной части кузова до 8 мм в консольных частях. Вариант 4 отличается от варианта 3 только обвязочным поясом.

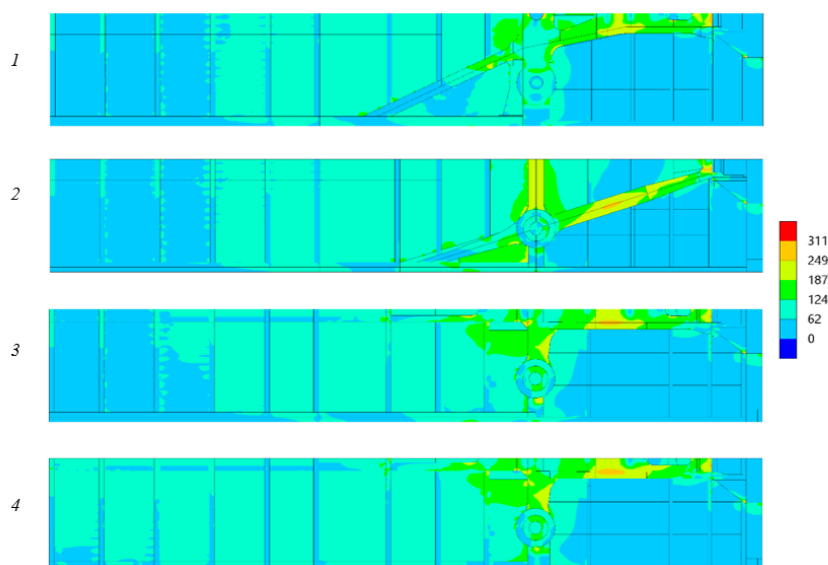
Конструкции рам разрабатывались, исходя из равнопрочности хребтовой и шкворневых балок, напряжения в основных несущих элементах во всех вариантах для расчетного случая Ia составляют 150–260 МПа и не превышают допускаемых значений.

### Снижение массы рамы для различных конструкций

Вариант	Описание	Обвязочный пояс	Прогиб от собственного веса кузова брутто, мм	Частота собственных изгибных колебаний кузова, Гц	Снижение массы	
					Абсолютное, кг	От массы рамы, %
1	Исходный	Труба	11,9	7,68	–	–
2	Длинные раскосы		13,6	7,73	544	8,2
3	Длинная хребтовая балка		12,7	7,71	344	5,2
4		Швеллер	13,0	7,64	716	10,8

Наличие значительной части потока сжимающих усилий, передающихся на обвязочный пояс, не позволяет уменьшать его сечение в вариантах 1 и 2, между тем перераспределение усилий между хребтовой балкой и обвязочным поясом позволяет уменьшить сечение обвязки в 2 раза в варианте 4. Сечение хребтовой балки в вариантах 1, 3 и 4 коробчатое, в варианте 2 хребтовая балка в виде двух двутавровых сечений является частью единых длинных раскосов. Варианты исполнения рамы 2 и 4 позволяют снизить ее массу примерно на 10 %, в варианте 3 снижение массы около 5 %.

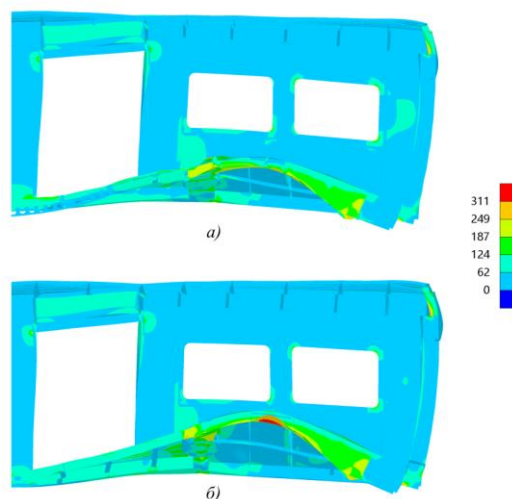
В исходном варианте часть раскосов и шкворневых балок остается ненагруженной, что позволяет уменьшить их массу. В варианте с длинными раскосами выражено увеличение напряжений в области небольшой концентрации скругления нижнего листа хребтовой балки. Поэтому при топологической оптимизации консоли было получено увеличенное поперечное сечение в этой области (рис. 2). По изображениям напряженного состояния видно, что раскосы в варианте 2 работают эффективнее, чем в исходном. При сокращении в два раза сечения обвязочного пояса в варианте 4 происходит увеличение средних напряжений в области металлического настила по причине уменьшения общего поперечного сечения кузова в сравнении с остальными вариантами, тем не менее напряжения находятся в пределах допускаемых значений (рис. 3).



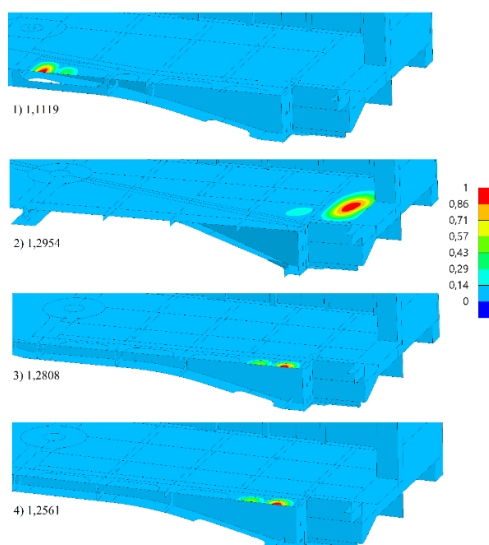
**Рис. 3. Эквивалентные напряжения по Мизесу в расчетном случае Ia, МПа:**  
 1 – исходная модель; 2 – длинные раскосы; 3 – длинная хребтовая балка;  
 4 – хребтовая балка с ослабленным обвязочным поясом

Однако для варианта 2 из-за сниженного сечения шкворневой балки целесообразно использовать передачу продольных усилий от тележки к кузову в виде наклонной тяги, в то время как варианты 1, 3 и 4 позволяют использовать традиционное для МВПС шкворневое соединение. При этом в вариантах 3 и 4 из-за полноценной хребтовой балки изгибающий момент передается от шкворня на кузов при продольных усилиях с незначительным превышением допускаемых напряжений, что может быть устранено локальным усилением. На рис. 4 показано распределение эквивалентных напряжений в расчетном случае Iб, при котором на кузов действует сжимающее усилие 2 МН в области крепления сцепного устройства, усилие 350 кН, действующее от тележки на кузов через шкворневое соединение, собственный вес оборудованного кузова брутто и продольная инерционная нагрузка  $26 \text{ м/с}^2$ .

Линейные расчеты устойчивости показывают, что конструкции всех вариантов обладают необходимым коэффициентом запаса устойчивости не менее 1,1 (рис. 5). Предварительные расчеты прочности для расчетных случаев II и III [16] с учетом коэффициента вертикальной динамики второй степени 0,2 показывают, что напряжения в критических областях шкворневых и хребтовых балок находятся в пределах 120–180 МПа и не превышают допускаемого значения 207 МПа, что косвенно свидетельствует о достаточном сопротивлении усталости. Для повышения коэффициента запаса устойчивости и сопротивления усталости конструкция может быть локально усилена, что не приведет к заметному увеличению массы рамы.



**Рис. 4. Эквивалентные напряжения по Мизесу консоли в расчетном случае Iб, МПа (действие продольных инерционных нагрузок):**  
а – для варианта 1; б – для вариантов 3 и 4



**Рис. 5. Формы потери устойчивости по первой моде и коэффициенты запаса:**  
1 – исходная модель; 2 – длинные раскосы; 3 – длинная хребтовая балка;  
4 – хребтовая балка с ослабленным обвязочным поясом

В таблице также приведены значения первой частоты собственных изгибных колебаний кузова с учетом податливости опор. Изменение конструктивной схемы консоли рамы практически не оказывает влияние на значение частоты, т.к. жесткость сечения кузова не меняется существенно, но в то же время в вариантах 2, 3 и 4 снижается масса конструкции. Тем не менее в варианте 4 установка швеллера вместо профиля замкнутого сечения приводит к уменьшению крутильной жесткости обвязочного профиля и понижению частоты колебаний кузова на 1 %. Повышение значения частоты до нормативного значения 8 Гц возможно за счет учета жесткости подвагонного и крышевого оборудования и балок его крепления [18], а также при необходимости за счет дополнительных усилений.

### **Заключение**

Металлоемкость традиционной конструкции рамы кузова для вагонов МВПС может быть снижена при изменении ее конструктивной схемы. Раскосы и шкворневая балка являются обычно недогруженными элементами, однако удаление раскосов приводит к избыточному изгибу шкворневой балки при действии продольных усилий. Наиболее тяжеловесными частями рамы кузова являются консольные части, поэтому их оптимизация является наиболее эффективной.

Показано, что масса рамы может быть снижена на 11 % при расположении раскосов рамы в одну линию с укороченной хребтовой балкой, либо при безраскосной схеме с хребтовой балкой по всей длине рамы. При этом прогиб кузова от собственного веса возрастает на 14 и 6 %, соответственно. Конструктивная схема с длинной хребтовой балкой предпочтительнее схемы с длинными раскосами из-за большего снижения массы и меньшего снижения жесткости кузова. При этом сечение хребтовой балки в средней части кузова может быть существенно уменьшено из-за постепенного перераспределения потока сжимающих усилий, передающихся от сцепного устройства. Единая хребтовая балка позволяет сократить до 2 раз сечение обвязочного профиля. Также такой вариант позволяет использовать традиционное шкворневое соединение кузова и тележки, в то время как для схемы с длинными раскосами более подходящим является соединение в виде наклонной тяги.

При снижении массы рамы в консольных частях значение частоты собственных изгибных колебаний кузова изменяется не более чем на 0,5 %.

### **Список литературы**

- 1 Natural Frequency Evaluation of a Lightweight GFRP Composite Bogie Frame / J.-S. Kim, W.-G. Lee, H.-K. Kim, H.-J. Yoon // International journal of precision engineering and manufacturing. – 2015. – Vol. 16 (1). – P. 105–111. – DOI 10.1007/s12541-015-0013-5.
- 2 Structural lightweight components for energy-efficient rail vehicles using high performance composite materials / A. Ulbricht, F. Zeidlera, F. Bilkenrotha, S. Soltysiaka // Transportation Research Procedia. – 2023. – Vol. 72. – P. 1685–1692. – DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.641.
- 3 Обоснование конструктивных решений по повышению жесткости несущей конструкции кузова пассажирского вагона / Д. Я. Антипин, Е. В. Лукашова, А. П. Болдырев, Ф. Ю. Лозбинец // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 5 (17). – С. 60–68. – DOI 10.30987/2782-5957-2023-5-60-68.
- 4 **Гучинский, Р. В.** Оптимизация конструкции кузова вагона электропоезда по значению частоты собственных колебаний / Р. В. Гучинский // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2021. – Т. 80, № 3. – С. 152–159. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-3-152-159.

### **References**

- 1 Natural Frequency Evaluation of a Lightweight GFRP Composite Bogie Frame / J.-S. Kim, W.-G. Lee, H.-K. Kim, H.-J. Yoon // International journal of precision engineering and manufacturing. – 2015. – Vol. 16 (1). – P. 105–111. – DOI 10.1007/s12541-015-0013-5.
- 2 Structural lightweight components for energy-efficient rail vehicles using high performance composite materials / A. Ulbricht, F. Zeidlera, F. Bilkenrotha, S. Soltysiaka // Transportation Research Procedia. – 2023. – Vol. 72. – P. 1685–1692. – DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.641.
- 3 Justification of designs to increase the bearing structure rigidity of the passenger car body / D. Ya. Antipin, E. V. Lukashova, A. P. Boldyrev, F. Yu. Lozbinev // Transport Engineering – 2023. – No. 5 (17). – P. 60–68. – DOI 10.30987/2782-5957-2023-5-60-68.
- 4 **Guchinsky, R.V.** Optimization of an EMU train car body by the value of the natural vibration frequency / R. V. Guchinsky // Russian Railway Science Journal. – 2021. – Vol. 80, No. 3. – P. 152–159. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-3-152-159.

5 **Гучинский, Р. В.** Расчет частоты собственных изгибных колебаний кузова вагона электропоезда с учетом податливости опор / Р. В. Гучинский // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (42). – С. 4–11. – DOI 10.20291/2079-0392-2019-2-4-11.

6 Research on lightweight rail vehicle body based on sensitivity analysis / J. Yin, Q. Zhang, X. Li, Y. Zhu [et al.] // J. Eng. Technol. Sci. – 2024. – Vol. 56 (3). – P. 353–366. – DOI 10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.3.4.

7 **Seo, S. I.** Development of a hybrid composite bodyshell for tilting trains / S. I. Seo, J. S. Kim, S. H. Cho // Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit. – 2008. – Vol. 222 (1). – P. 1–13. – DOI 10.1243/09544097JRRT96.

8 Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels / H. A. Lee, S. B. Jung, H.-H. Jang [et al.] // Journal of Rail and Rapid Transit. – 2015. – Vol. 230 (4). – P. 1283–1296. – DOI 10.1177/0954409715593971.

9 The next generation material for lightweight railway car body structures : Magnesium alloys / W. G. Lee, J. S. Kim, S.-J. Sun, J. Y. Lim // J Rail and Rapid Transit. – 2018. – Vol. 232 (1). – P. 25–42. – DOI 10.1177/0954409716646140.

10 Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва : ВНИИВ – ВНИИЖТ, 1983. – 260 с.

11 **Cascino, A.** A strategy for lightweight designing of a railway vehicle car body including composite material and dynamic structural optimization / A. Cascino, E. Meli, A. Rindi // Railway Engineering Science. – 2023. – Vol. 31 (4). – P. 340–350. – DOI 10.1007/s40534-023-00312-6.

12 **Петин, С. В.** Идентичность повреждения в расчете ресурса конструкций / С. В. Петин, Р. В. Гучинский, В. Г. Сидоренко // Инженерно-строительный журнал. – 2016. – № 1 (61). – С. 82–88. – DOI 10.5862/MCE.61.8.

13 **Guchinsky, R. V.** Uncertainties in fatigue assessment of structures in design and in service / R. V. Guchinsky, S. V. Petinov // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2021. – No. 4 (52). – С. 35–44. – DOI 10.20291/2079-0392-2021-4-35-44.

14 СТО СДС ОПЖТ-05-2010. Нормы для проектирования, расчета и оценки прочности и динамики механической части вагонов метрополитена колеи 1520 мм. – Москва, 2010. – 115 с.

15 Руководство по устройству электропоездов серии ЭТ2, ЭР2Т, ЭД2Т, ЭТ2М. – Москва : Центр коммерческих разработок, 2003. – 184 с.

5 **Guchinsky, R. V.** Calculation of the frequency of natural bending vibrations of the car body of an electric train with consideration for support yield / R. V. Guchinsky // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2019. – No. 2 (42). – P. 4–11. – DOI 10.20291/2079-0392-2019-2-4-11.

6 Research on lightweight rail vehicle body based on sensitivity analysis / J. Yin, Q. Zhang, X. Li, Y. Zhu [et al.] // J. Eng. Technol. Sci. – 2024. – Vol. 56 (3). – P. 353–366. – DOI 10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.3.4.

7 **Seo, S. I.** Development of a hybrid composite bodyshell for tilting trains / S. I. Seo, J. S. Kim, S. H. Cho // Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit. – 2008. – Vol. 222 (1). – P. 1–13. – DOI 10.1243/09544097JRRT96.

8 Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels / H. A. Lee, S. B. Jung, H.-H. Jang [et al.] // Journal of Rail and Rapid Transit. – 2015. – Vol. 230 (4). – P. 1283–1296. – DOI 10.1177/0954409715593971.

9 The next generation material for lightweight railway car body structures : Magnesium alloys / W. G. Lee, J. S. Kim, S.-J. Sun, J. Y. Lim // J Rail and Rapid Transit. – 2018. – Vol. 232 (1). – P. 25–42. – DOI 10.1177/0954409716646140.

10 Standards for the calculation and design of new and modernized cars for the 1520 mm gauge railways of the Ministry of Railways (non-self-propelled). – Moscow : VNIIV – VNIIZhT, 1983. – 260 p.

11 **Cascino, A.** A strategy for lightweight designing of a railway vehicle car body including composite material and dynamic structural optimization / A. Cascino, E. Meli, A. Rindi // Railway Engineering Science. – 2023. – Vol. 31 (4). – P. 340–350. – DOI 10.1007/s40534-023-00312-6.

12 **Petin, S. V.** Damage identity in fatigue assessment of structures / S. V. Petinov, R. V. Guchinsky, V. G. Sidorenko // Magazine of Civil Engineering. – 2016. – No. 1. – P. 82–88. – DOI 10.5862/MCE.61.8.

13 **Guchinsky, R. V.** Uncertainties in fatigue assessment of structures in design and in service / R. V. Guchinsky, S. V. Petinov // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2021. – No. 4 (52). – С. 35–44. – DOI 10.20291/2079-0392-2021-4-35-44.

14 STO SDS OPZHT-05-2010. Norms for design, calculation and evaluation of the strength and dynamics of the mechanical part of metro cars of gauge 1520 mm. – Moscow, 2010. – 115 p.

15 Guide to the arrangement of electric trains of the ET2, ER2T, ED2T, ET2M series. – Moscow : Center for Commercial Development, 2003. – 184 p.

16 ГОСТ 33796–2016. Моторвагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 35 с.

17 ГОСТ 34451–2018. Моторвагонный подвижной состав. Методика динамико-прочностных испытаний. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 22 с.

18 Гучинский, Р. В. Влияние жесткости оборудования на собственную частоту изгибных колебаний кузова вагона электропоезда / Р. В. Гучинский // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – Т. 77, № 4. – С. 251–255. – DOI 10.21780/2223-9731-2018-77-4-251-255.

16 GOST 33796–2016. Multiple-unit rolling stock. Requirements for strength and dynamic qualities. – Moscow : Standartinform, 2016. – 35 p.

17 GOST 34451–2018. Multiple-unit rolling stock. Method of dynamic strength tests. – Moscow : Standartinform, 2018. – 22 p.

18 Guchinsky, R. V. Influence of equipment rigidity on the natural bending frequency of the EMU train car body / R. V. Guchinsky // Vniizht Bulletin (Railway Research Institute Bulletin). – 2018. – Vol. 77, No. 4. – P. 251–255. – DOI 10.21780/2223-9731-2018-77-4-251-255.

*R. V. Guchinsky*

### REDUCING THE METAL INTENSITY OF THE EMU-TRAIN CAR BODY FRAME

**Abstract.** Increasing the design speeds of modern rolling stock inevitably requires a reduction in its weight. Optimization of the frame is advisable due to its largest weight fraction within the car body. Frame versions are considered that allow for weight reduction compared to the traditional diagonal design for EMU-trains in this paper. It is shown that a design combining the center beam with the diagonals into single long diagonals is suitable for transferring loads from the coupling to the frame profile. It was found that a single-braced center beam along the entire length of the car body is the most efficient in terms of transmitting longitudinal forces. However, to reduce metal intensity, it can be significantly weakened in the central part of the car body. The center beam design for the considered structure reduces the frame weight by 11 % and halves the cross-section of the frame profile, while increasing the deflection due to dead weight by 9%. This design allows for the retention of the pin connection between the bogie and the body, typical for electric trains.

**Keywords:** strength, rigidity, electric train, finite element method, optimization, car body, car dynamics.

**For citation:** Guchinsky, R. V. Reducing the metal intensity of the EMU-train car body frame / R. V. Guchinsky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 102–109. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_102.

#### Сведения об авторах

Гучинский Руслан Валерьевич  
ООО «Троицкий Крановый Завод»,  
ОП Санкт-Петербург,  
инженер-расчетчик,

Институт проблем машиноведения РАН  
(ИПМаш РАН),  
лаборатория прикладных исследований,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: ruslan239@mail.ru

#### Information about the authors

Guchinsky Ruslan Valerievich  
Troitsk Crane Plant Ltd,  
Saint-Petersburg Department,  
Structural Engineer,

Institute for Problems of Mechanical  
Engineering of the RAS (IPME RAS),  
Applied Research Laboratory,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Senior Research Officer,  
e-mail: ruslan239@mail.ru

*С. Н. Коржов, П. А. Поляков, И. А. Яицков*

## МЕТОД РАСЧЕТА НОРМАЛЬНЫХ И ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ СИЛОВЫХ ФАКТОРОВ В ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВАХ С КЛЕЩЕВЫМ МЕХАНИЗМОМ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА НА КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ

**Аннотация.** Увеличение скорости движения подвижного состава для перевозки пассажиропотока предполагает повышенные требования к системам, обеспечивающим безопасность. Методы расчета современного тормозного оборудования электропоездов усредняют технические характеристики тормозной системы и не учитывают движение на кривых участках железнодорожного полотна, когда эффективность работы силовых устройств минимальна. Проведенное исследование позволяет скорректировать процесс расчета тормозного оборудования для участков со сложным рельефом. Рассматривая данные особенности смещения центров давления во фрикционных узлах, возможно учитывать неравномерность вклада каждой колодки тормозных устройств дисково-колодочного типа в общую тормозную силу всего подвижного состава. Полученные зависимости дают возможность учитывать влияние характеристик подвески тележек на величину неравномерности нормальных и тангенциальных сил как вагона в целом, так и для каждой отдельной колесной пары. На основании проведенного исследования сформулированы два возможных направления решения выявленной проблемы: увеличение жесткости подвески вагона, что ухудшит комфортабельность перевозки пассажиров, и усовершенствование конструкции тормозных устройств, что позволит выровнять нормальные силы по площади колодок и снизить неравномерность вклада каждой колодки колесных пар подвижного состава.

**Ключевые слова:** торможение, тормозное устройство, клещевой механизм, нормальная сила, нормальные и тангенциальные силы.

**Для цитирования:** Коржов, С. Н. Метод расчета нормальных и тангенциальных силовых факторов в тормозных устройствах с клещевым механизмом при движении электропоезда на кривых участках пути / С. Н. Коржов, П. А. Поляков, И. А. Яицков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 110–120. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_110.

### **Введение**

В исследовании [1] с использованием метода реверсивного инжиниринга получена 3D-модель тормозной колодки железнодорожного подвижного состава для дальнейшего определения радиуса трения поверхности качения обода колесной пары. В работе [2] предложена модель комбинированного торможения с использованием гибридных конструкций тормозных систем. Исследователи пришли к выводу, что применение гибридных тормозных систем позволит увеличить максимальную безопасную скорость движения подвижного состава. В статье [3] рассматривались модели с различным количеством пневматических труб для наполнения тормозных цилиндров системы обеспечения работы остановкой подвижного состава. В результате было выявлено, что двухтрубная тормозная система позволяет развивать значительно больший тормозной эффект, чем однотрубная тормозная система при аналогичном техническом состоянии пневматической системы поезда. Как следствие, при новом способе организации питания запасного резервуара наблюдается значительное сокращение времени подготовки тормозов к действию, а также сокращение длины полного тормозного пути. В диссертации [4] рассмотрена рациональная конструкция тормозного устройства дисково-колодочного типа для компенсации неравномерности износа по площади тормозных колодок. Это достигается компенсацией подвижностей колесной пары при прохождении кривых участков с малыми радиусами. В результате опытного образца клиновидный износ снижался до нуля при применении тормозного устройства с модернизированной конструкцией клещевого механизма. В статье [5] представлен метод оценки толщины тормозных колодок железнодорожного дискового тормоза на основе результатов параметризации частотно-временной карты вибраций во фрикционном узле тормоза. В качестве инструмента частотно-временного выделения вибрационного сигнала были предложены методы частотно-временного анализа. Авторы описали алгоритм метода и привели пример его применения для выделения компонентов сигнала, связанных с процессом торможения. В результате параметризации карты были получены значения, коррелирующие с толщи-

ной дискового тормоза. В диссертационной работе [6] проводились исследования, связанные с экстремальным торможением, возникающими температурными воздействиями, усталостью от контакта при качении и износом тормозных компонентов. Цель работы состояла в том, чтобы определить допустимые диапазоны термомеханического воздействия на обод колеса при взаимодействии с колодочным тормозом, при которых не наступает повреждений обода колесной пары. Температурные поля на поверхностях катания колесных пар были исследованы в ходе стендовых испытаний и в натуральных условиях. Результаты этих исследований показывают, что температурное поле может привести к образованию серьезных длинноволновых неоднородностей, которые могут привести к повышению уровня остаточных напряжений в колесе. Показано, что термическая деструкция, которой подвергается перлитная сталь, существенно влияет на механическую прочность материала, вызывая пластификацию поверхности прокатки. Работа с численными моделями была сосредоточена как на калибровке характеристик материала, используемого в модели, для точного и стабильного моделирования поведения, наблюдаемого в экспериментах, так и на ее последующем использовании для изучения предполагаемых сценариев торможения. В диссертации рассматриваются как моделирование торможения колодочным тормозом при высоких тормозных нагрузках, так и контакта при качении при повышенных температурах после процесса торможения. В статье [7] определялись зоны перегрева на поверхностях тормозных дисков. Зоны имели различную микроструктуру и механические свойства, а термические искажения вблизи них приводили к циклическим растягивающим и сжимающим напряжениям. Эти напряжения могут вызывать появление радиальных, трещиноватых и кольцевых усталостных трещин. Быстрый рост термических трещин представляет серьезную угрозу для безопасности эксплуатации поездов, которая в настоящее время линейно возрастает с увеличением скорости. В статье [8] были сделаны следующие выводы: в процессе торможения поезда самовозбуждающиеся колебания присутствуют на всех этапах работы колодочного тормоза; тормозные колодки следует крепить к раме с помощью винтов, проходящих через колодку, а не четырех винтов, расположенных параллельно ободу колесной пары.

Проанализировав результаты предшествующих исследований, можно сделать вывод, что исследования в области тормозных устройств являются достаточно насыщенными по содержанию. Но при этом в исследованиях недостаточно внимания уделяют механической части тормозного оборудования, а именно, клещевому механизму тормозного устройства дисково-колодочного типа. Строение тормозного устройства с клещевым механизмом является крайне сложной по настройке системой, управлять которой проблематично ввиду размещения отдельных элементов на двух разнесенных узлах ходовой части вагона. Клещевой механизм закреплен жестко на раме тележки, что предполагает относительное перемещение с другой частью устройства – тормозным диском, который зафиксирован на колесной паре. В результате торможения тележка поезда продолжает двигаться по инерции, тогда как колесная пара испытывает сопротивление при трении качения. Относительные перемещения двух элементов фрикционного узла образуют неравномерность нагружения отдельных участков колодки, что приводит к дискретному износу по всей площади колодки. В связи с чем тормозная сила для каждого вагона образовывается стохастически имеющимся количеством тормозных устройств. Для систематизации и выравнивания нагрузки между тормозными устройствами важно разработать метод определения нормальных силовых факторов для каждой пары трения тормозного оборудования вагона. Для решения выявленной проблемы приведена математическая модель для определения нормальных и тангенциальных сил при движении подвижного состава по кривому участку, который является частным случаем при рассмотрении неравномерности распределения тормозной силы подвижного состава.

### ***Материалы и методы***

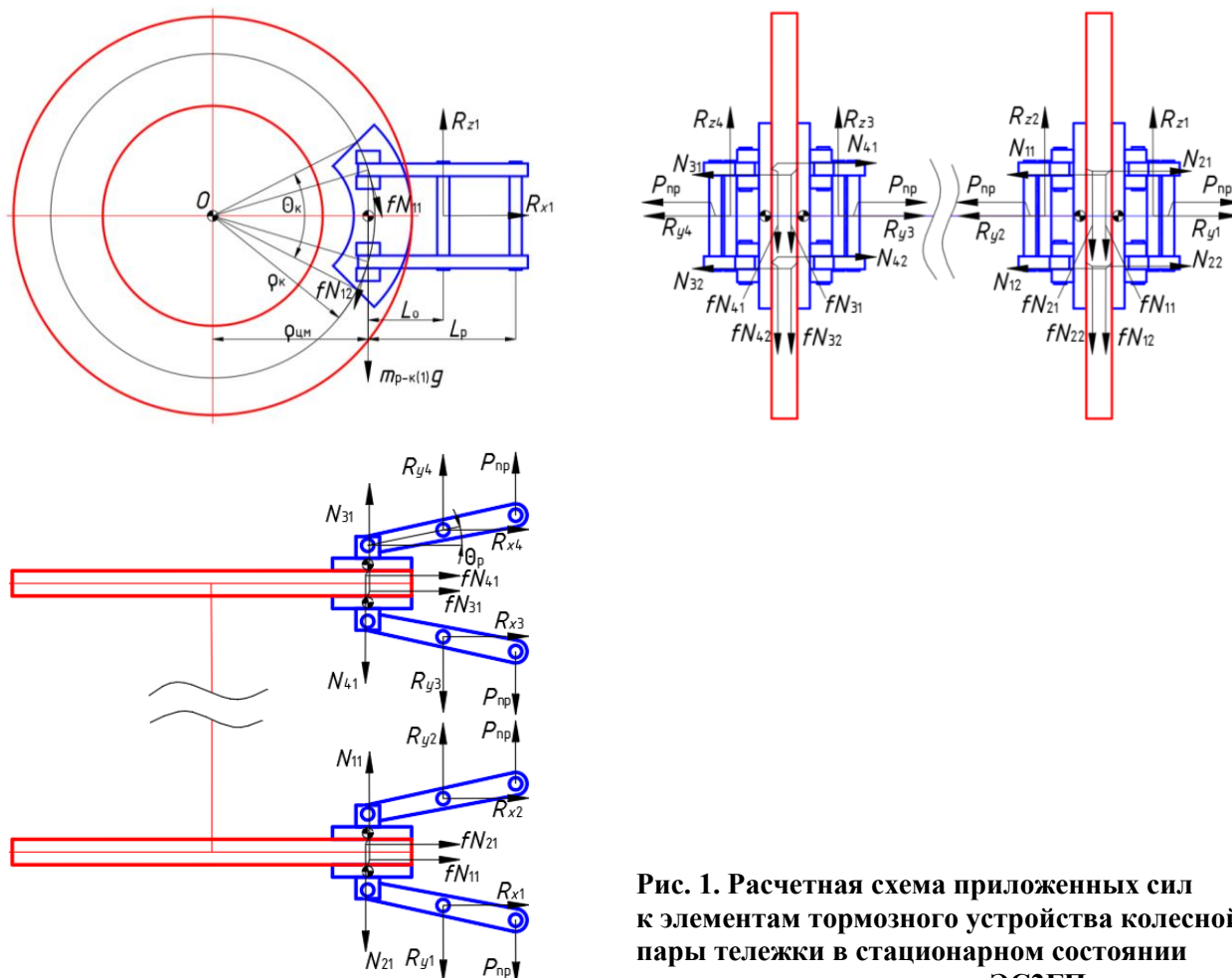
Для торможения на ровном участке существуют принятые методики для определения тормозных сил для тормозных устройств дисково-колодочного типа с клещевым механизмом, которые позволяют определять другие параметры тормозного процесса. Рассмотрим для примера расчетную схему тормозного устройства, находящегося в стационарном состоянии, при работе стояночной системы торможения электропоезда (рис. 1). Колодки прижаты к рабочим поверхностям тормозного диска по всей своей рабочей поверхности так, что нормальные силы выполнены как сосредоточенные в точках наибольшего давления тормозного привода на поверхности фрикционного узла. Как видно из расчетной схемы, нормальные силы распределяются равномерно по всей площади колодки. Если рассматривать идеализированную модель (без наличия дефектов тормозного оборудования и тележки вагона), то нормальные силы будут одинаково вносить вклад в удержание колесной пары в статичном положении. Радиус положения центра давления будет одинаков только в случае одинакового износа на всех тормозных колодках колесной пары. При торможении в процессе движения по прямолинейному участку

радиусы каждой пары торможения могут отличаться, что незначительно должно вносить различный вклад в тормозную силу каждым фрикционным узлом.

Тормозная сила для стационарного состояния колесной пары рассчитывается из зависимости:

$$B_{\tau} = n f N r / R, \quad (1)$$

где  $n$  – количество взаимодействующих пар тормозного устройства;  $N$  – нормальная сила в контакте фрикционного узла, Н;  $f$  – коэффициент трения в паре тормоза,  $r$  – радиус положения центра давления во фрикционном узле [9], м;  $R$  – радиус поверхности катания колесной пары, м.



**Рис. 1. Расчетная схема приложенных сил к элементам тормозного устройства колесной пары тележки в стационарном состоянии на примере электропоезда ЭС2ГП**

При движении на кривых участках колесные пары каждой тележки накрены из-за кривизны железнодорожного полотна, тележка вагона вместе с кузовом также накрены, при этом углы крена для колесных пар и тележки не равны друг другу. Это возможно благодаря отсутствию жесткой связи между тележкой и колесными парами. При торможении на кривых участках тележки электропоезда нагружены неравномерно нормальными нагрузками, в результате в тележках наблюдаются, помимо крена рамы, продольный наклон и рыскание, в результате клещевые механизмы, закрепленные на раме тележки, смещаются относительно рабочих поверхностей дисков, что вызывает изменение радиуса положения центра давления для каждого фрикционного узла. Относительный крен тележек и колесных пар приводит к смещению нормальных сил в каждой паре фрикционного узла к краям тормозных колодок. Рассмотрим расчетные схемы тормозных устройств каждой из колесных пар тележек при торможении на кривом участке пути (левый поворот).

Передняя колесная пара испытывает наибольшую нагрузку от распределенного веса вагона электропоезда при торможении. Продольный крен тележки заставляет смещаться тормозную колодку ниже оси вращения колесной пары  $O$ , что отражено на рис. 2.

В качестве допущений элементы тормозного устройства будут рассматриваться как абсолютно-жесткие тела. Для описания перемещения колодки воспользуемся центром окружности, проходящей через центры передачи нормальных сил от привода к колодкам, обозначенным  $O_1$ . При стационарном

положении центры окружностей передачи нормальных сил от привода к колодкам и ось вращения колесной пары совпадают и обозначены точкой  $O$ .

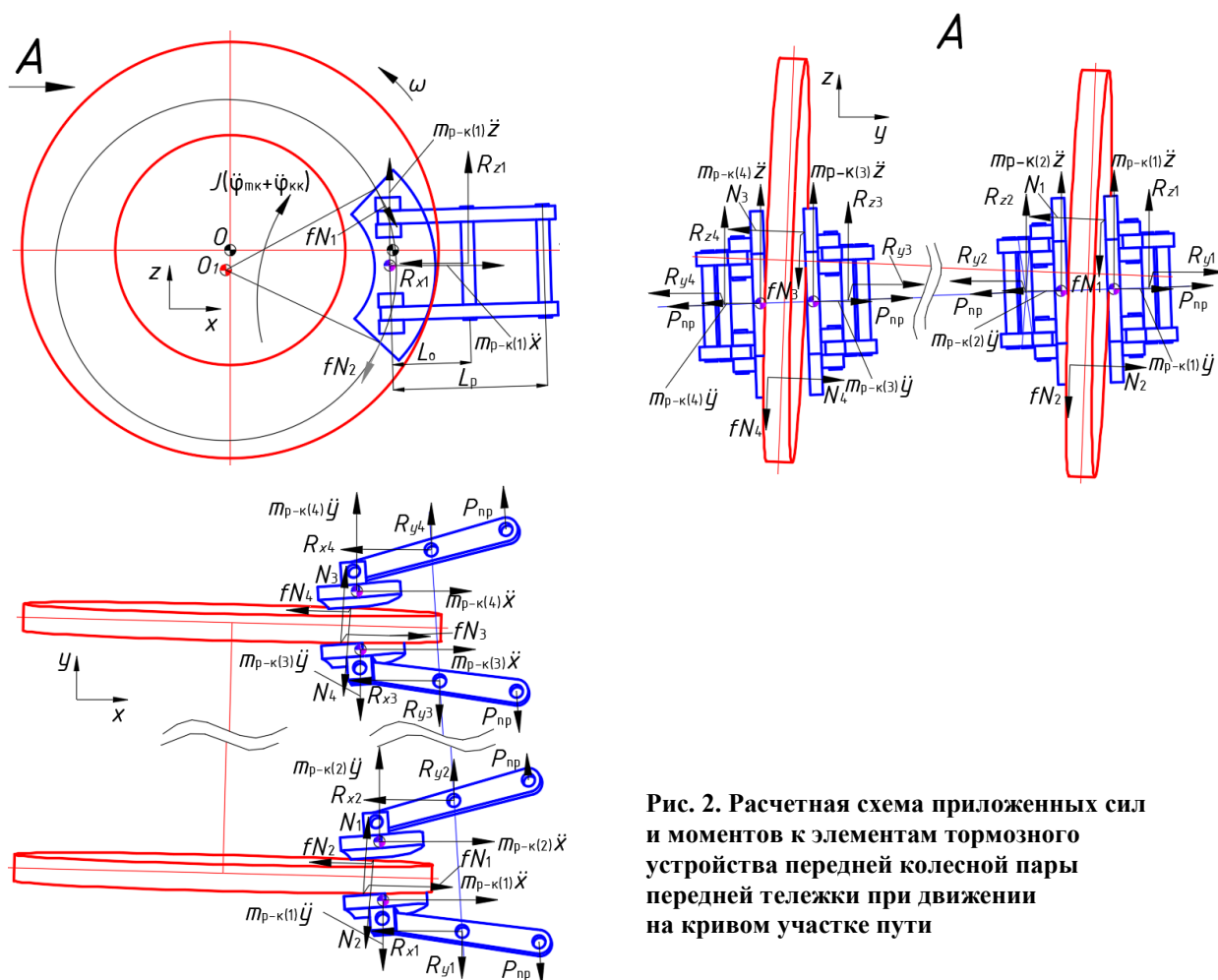


Рис. 2. Расчетная схема приложенных сил и моментов к элементам тормозного устройства передней колесной пары передней тележки при движении на кривом участке пути

В результате торможения центр вращения  $i$ -й тормозной колодки  $O_1$  смещается относительно центра вращения колесной пары на величины  $\Delta x_{цмi}$ ,  $\Delta z_{цмi}$ . В поперечном плане тормозные колодки нечетной стороны клещевых механизмов тормозных устройств передней колесной пары взаимодействуют верхними краями с рабочими поверхностями диска. В результате нормальные и тангенциальные силы  $N_{1(3)}$ ,  $fN_{1(3)}$  смещаются вверх по вертикальной оси, тогда как нормальные и тангенциальные силы четных колодок  $N_{2(4)}$ ,  $fN_{2(4)}$  наоборот смещаются к нижнему краю.

Составим систему уравнений сил и моментов, действующих для нечетных и четных сторон тормозных устройств передней колесной пары:

– нечетной системы

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n F_Z : m_{p-k(1(3))}\ddot{z} + R_{z1(3)} + N_{1(3)} \sin \varphi_{ko} \sin \varphi_{tt} - fN_{1(3)} \cos \varphi_{ko} \cos (\Theta_k + \varphi_{tt}) + \\ + P_{np} \sin \varphi_{kt} \sin \varphi_{tt} = 0; \\ \sum_{i=1}^n F_X : m_{p-k(1(3))}\ddot{x} - R_{x1(3)} + N_{1(3)} \sin \varphi_{po} \cos \varphi_{tt} + fN_{1(3)} \cos \varphi_{po} \sin (\Theta_k + \varphi_{tt}) + P_{np} \sin \varphi_{pt} \cos \varphi_{tt} = 0; \\ \sum_{i=1}^n M_{OY} : J_{p-k(1(3))} (\ddot{\varphi}_{tk} + \ddot{\varphi}_{kk}) - m_{p-k(1(3))}\ddot{z} [\rho_{цм} \cos \varphi_{pt} \cos \varphi_{tt} - \Delta x_{цм1(3)}] - \\ - m_{p-k(1(3))}\ddot{x} [\Delta z_{цм1} - \rho_{цм} \cos \varphi_{pt} \sin \varphi_{tt}] - R_{z1(3)} [(\rho_{цм} \cos \varphi_{pt} + L_o \cos \Theta_p) \cos \varphi_{tt} - \Delta x_{цм1(3)}] - \\ + R_{x1(3)} [\Delta z_{цм1(3)} - (\rho_{цм} \cos \varphi_{pt} + L_o \cos \Theta_p) \sin \varphi_{tt}] - \\ - P_{np} \sin \varphi_{kt} \sin \varphi_{tt} [(\rho_{цм} \cos \varphi_{pt} + L_p \cos \Theta_p) \cos \varphi_{tt} - \Delta x_{цм1(3)}] - \dots \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dots \\ -P_{\text{пр}} \sin \varphi_{\text{пр}} \cos \varphi_{\text{тт}} \left[ \Delta z_{\text{цм1(3)}} - (\rho_{\text{цм}} \cos \varphi_{\text{пр}} + L_p \cos \Theta_p) \sin \varphi_{\text{тт}} \right] - \\ -N_{1(3)} \sin \varphi_{\text{ко}} \sin \varphi_{\text{тт}} \left[ \rho_k \cos (\Theta_k + \varphi_{\text{тт}}) \cos \varphi_{\text{пр}} - \Delta x_{\text{цм1(3)}} \right] + \\ +N_{1(3)} \sin \varphi_{\text{по}} \cos \varphi_{\text{тт}} \left[ \rho_k \sin (\Theta_k + \varphi_{\text{тт}}) \cos \varphi_{\text{кт}} - \Delta z_{\text{цм1(3)}} \right] + \\ +fN_{1(3)} \cos \varphi_{\text{ко}} \cos (\Theta_k + \varphi_{\text{тт}}) \left[ \rho_k \cos (\Theta_k + \varphi_{\text{тт}}) \cos \varphi_{\text{пр}} - \Delta x_{\text{цм1(3)}} \right] + \\ +fN_{1(3)} \cos \varphi_{\text{по}} \sin (\Theta_k + \varphi_{\text{тт}}) \left[ \rho_k \sin (\Theta_k + \varphi_{\text{тт}}) \cos \varphi_{\text{кт}} - \Delta z_{\text{цм1(3)}} \right] = 0; \end{array} \right. \quad (2)$$

– четной системы

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n F_Z : m_{\text{п-к(2(4))}} \ddot{z} + R_{z2(4)} - N_{2(4)} \sin \varphi_{\text{ко}} \sin \varphi_{\text{тт}} - fN_{2(4)} \cos \varphi_{\text{ко}} \cos (\Theta_k - \varphi_{\text{тт}}) - \\ -P_{\text{пр}} \sin \varphi_{\text{кт}} \sin \varphi_{\text{тт}} = 0; \\ \sum_{i=1}^n F_X : m_{\text{п-к(2(4))}} \ddot{x} - R_{x2(4)} - N_{2(4)} \sin \varphi_{\text{по}} \cos \varphi_{\text{тт}} - fN_{2(4)} \cos \varphi_{\text{по}} \sin (\Theta_k - \varphi_{\text{тт}}) - P_{\text{пр}} \sin \varphi_{\text{пр}} \cos \varphi_{\text{тт}} = 0; \\ \sum_{i=1}^n M_{OY} : J_{\text{п-к(2(4))}} (\ddot{\varphi}_{\text{тк}} + \ddot{\varphi}_{\text{кк}}) - m_{\text{п-к(2(4))}} \ddot{z} \left[ \rho_{\text{цм}} \cos \varphi_{\text{пр}} \cos \varphi_{\text{тт}} - \Delta x_{\text{цм2}} \right] - \\ -m_{\text{п-к(2(4))}} \ddot{x} \left[ \Delta z_{\text{цм2(4)}} - \rho_{\text{цм}} \cos \varphi_{\text{пр}} \sin \varphi_{\text{тт}} \right] - R_{z2(4)} \left[ (\rho_{\text{цм}} \cos \varphi_{\text{пр}} + L_o \cos \Theta_p) \cos \varphi_{\text{тт}} - \Delta x_{\text{цм2}} \right] + \\ +R_{x2(4)} \left[ \Delta z_{\text{цм2(4)}} - (\rho_{\text{цм}} \cos \varphi_{\text{пр}} + L_o \cos \Theta_p) \sin \varphi_{\text{тт}} \right] + \\ +P_{\text{пр}} \sin \varphi_{\text{кт}} \sin \varphi_{\text{тт}} \left[ (\rho_{\text{цм}} \cos \varphi_{\text{пр}} + L_p \cos \Theta_p) \cos \varphi_{\text{тт}} - \Delta x_{\text{цм2(4)}} \right] + \\ +P_{\text{пр}} \sin \varphi_{\text{пр}} \cos \varphi_{\text{тт}} \left[ \Delta z_{\text{цм2(4)}} - (\rho_{\text{цм}} \cos \varphi_{\text{пр}} + L_p \cos \Theta_p) \sin \varphi_{\text{тт}} \right] - \\ +N_{2(4)} \sin \varphi_{\text{ко}} \sin \varphi_{\text{тт}} \left[ \rho_k \cos (\Theta_k - \varphi_{\text{тт}}) \cos \varphi_{\text{пр}} - \Delta x_{\text{цм2(4)}} \right] - \\ +N_{2(4)} \sin \varphi_{\text{по}} \cos \varphi_{\text{тт}} \left[ \rho_k \sin (\Theta_k - \varphi_{\text{тт}}) \cos \varphi_{\text{кт}} + \Delta z_{\text{цм2(4)}} \right] + \\ +fN_{2(4)} \cos \varphi_{\text{ко}} \cos (\Theta_k - \varphi_{\text{тт}}) \left[ \rho_k \cos (\Theta_k - \varphi_{\text{тт}}) \cos \varphi_{\text{пр}} - \Delta x_{\text{цм2(4)}} \right] + \\ +fN_{2(4)} \cos \varphi_{\text{по}} \sin (\Theta_k - \varphi_{\text{тт}}) \left[ \rho_k \sin (\Theta_k - \varphi_{\text{тт}}) \cos \varphi_{\text{кт}} + \Delta z_{\text{цм2(4)}} \right] = 0; \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $m_{\text{п-к}(i)}$ ,  $J_{\text{п-к}(i)}$  – массы и моменты инерции  $i$ -х рычагов и колодок тормозных устройств колесной пары, соответственно, кг, кг/м<sup>2</sup>;  $\ddot{z}$ ,  $\ddot{x}$  – линейные ускорения колодки в соответствующих осях декартовых координат, м/с<sup>2</sup>;  $R_{zi}$ ,  $R_{xi}$  – вертикальная и продольные реакции  $i$ -го фрикционного узла тормозных устройств, Н;  $\varphi_{\text{ко}}$ ,  $\varphi_{\text{по}}$  – углы крена и рыскания колесной пары, град.;  $\varphi_{\text{тт}}$ ,  $\varphi_{\text{кт}}$ ,  $\varphi_{\text{пр}}$  – углы тангажа, крена и рыскания тележки, град.;  $\Theta_k$  – угол обхвата колодки, град.;  $P_{\text{пр}}$  – усилие привода, Н;  $\ddot{\varphi}_{\text{тк}}$ ,  $\ddot{\varphi}_{\text{кк}}$  – угловые ускорения колодки относительно продольной и поперечной осей тележки; с<sup>-2</sup>;  $\rho_{\text{цм}}$  – радиус окружности, проведенной через центры масс колодок, м;  $\rho_k$  – радиус окружности, проведенной через центры приложения нормальных и тангенциальных сил во фрикционных узлах тормозного устройства, м.

В результате преобразования нормальные силы для нечетной и четной сторон тормозных устройств определяются из зависимостей:

$$N_{1(3)} = \frac{\left[ \begin{array}{l} J_{\text{п-к1(3)}} (\ddot{\varphi}_{\text{тк}} + \ddot{\varphi}_{\text{кк}}) + m_{\text{п-к1(3)}} \ddot{z} L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{\text{тт}} + m_{\text{п-к1(3)}} \ddot{x} L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{\text{тт}} + \\ +P_{\text{пр}} \sin \varphi_{\text{кт}} \sin \varphi_{\text{тт}} (L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{\text{тт}} - L_p \cos \Theta_p \cos \varphi_{\text{тт}}) + \\ +P_{\text{пр}} \sin \varphi_{\text{пр}} \cos \varphi_{\text{тт}} (L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{\text{тт}} - L_p \cos \Theta_p \sin \varphi_{\text{тт}}) \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{l} (f \cos \varphi_{\text{ко}} \cos [\Theta_k + \varphi_{\text{тт}}] - \sin \varphi_{\text{ко}} \sin \varphi_{\text{тт}}) \left( \left[ (\rho_{\text{цм}} \cos \varphi_{\text{пр}} + L_o \cos \Theta_p) \cos \varphi_{\text{тт}} - \Delta x_{\text{цм1(3)}} \right] - \right. \\ \left. - \left[ \rho_k \cos (\Theta_k + \varphi_{\text{тт}}) \cos \varphi_{\text{пр}} - \Delta x_{\text{цм1(3)}} \right] \right) \\ - (\sin \varphi_{\text{по}} \cos \varphi_{\text{тт}} + f \cos \varphi_{\text{по}} \sin [\Theta_k + \varphi_{\text{тт}}]) \left( \left[ \Delta z_{\text{цм1(3)}} - (\rho_{\text{цм}} \cos \varphi_{\text{пр}} + L_o \cos \Theta_p) \sin \varphi_{\text{тт}} \right] + \right. \\ \left. \left[ \rho_k \sin (\Theta_k + \varphi_{\text{тт}}) \cos \varphi_{\text{кт}} - \Delta z_{\text{цм1(3)}} \right] \right) \end{array} \right]} \quad (4)$$

$$N_{2(4)} = \begin{bmatrix} J_{p-k(4)} (\ddot{\varphi}_{TK} + \ddot{\varphi}_{KK}) + m_{p-k(2(4))} \ddot{z} L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT} + m_{p-k(2(4))} \ddot{x} L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} + \\ + P_{np} \sin \varphi_{KT} \sin \varphi_{TT} (L_p \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} - L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT}) + \\ + P_{np} \sin \varphi_{PT} \cos \varphi_{TT} (L_p \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} - L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} (\sin \varphi_{ko} \sin \varphi_{TT} + f \cos \varphi_{ko} \cos [\Theta_k - \varphi_{TT}]) \left( \begin{bmatrix} (\rho_{um} \cos \varphi_{PT} + L_o \cos \Theta_p) \cos \varphi_{TT} - \Delta x_{um2} \\ \rho_k \cos (\Theta_k - \varphi_{TT}) \cos \varphi_{PT} - \Delta x_{um2(4)} \end{bmatrix} - \right) \\ (\sin \varphi_{po} \cos \varphi_{TT} + f \cos \varphi_{po} \sin [\Theta_k - \varphi_{TT}]) \left( \begin{bmatrix} \Delta z_{um2(4)} - (\rho_{um} \cos \varphi_{PT} + L_o \cos \Theta_p) \sin \varphi_{TT} \\ \rho_k \sin (\Theta_k - \varphi_{TT}) \cos \varphi_{KT} + \Delta z_{um2(4)} \end{bmatrix} - \right) \end{bmatrix}$$

Рассмотрим расчетные схемы приложенных сил к элементам тормозных устройств остальных колесных пар передней и задней тележек. Используя аналогичные системы уравнений сил и моментов, действующих на нечетные и четные пары трения тормозных устройств, запишем нормальные силы для каждой из сторон фрикционного узла.

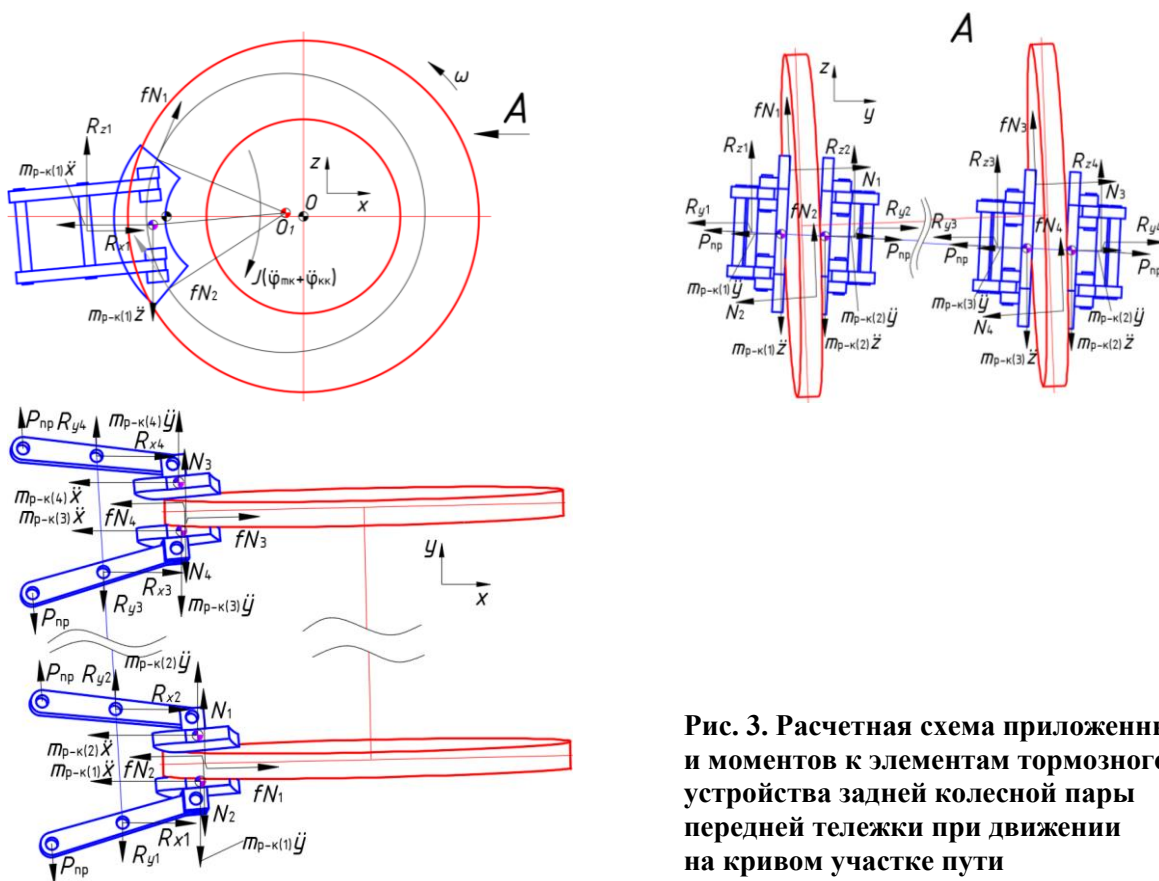


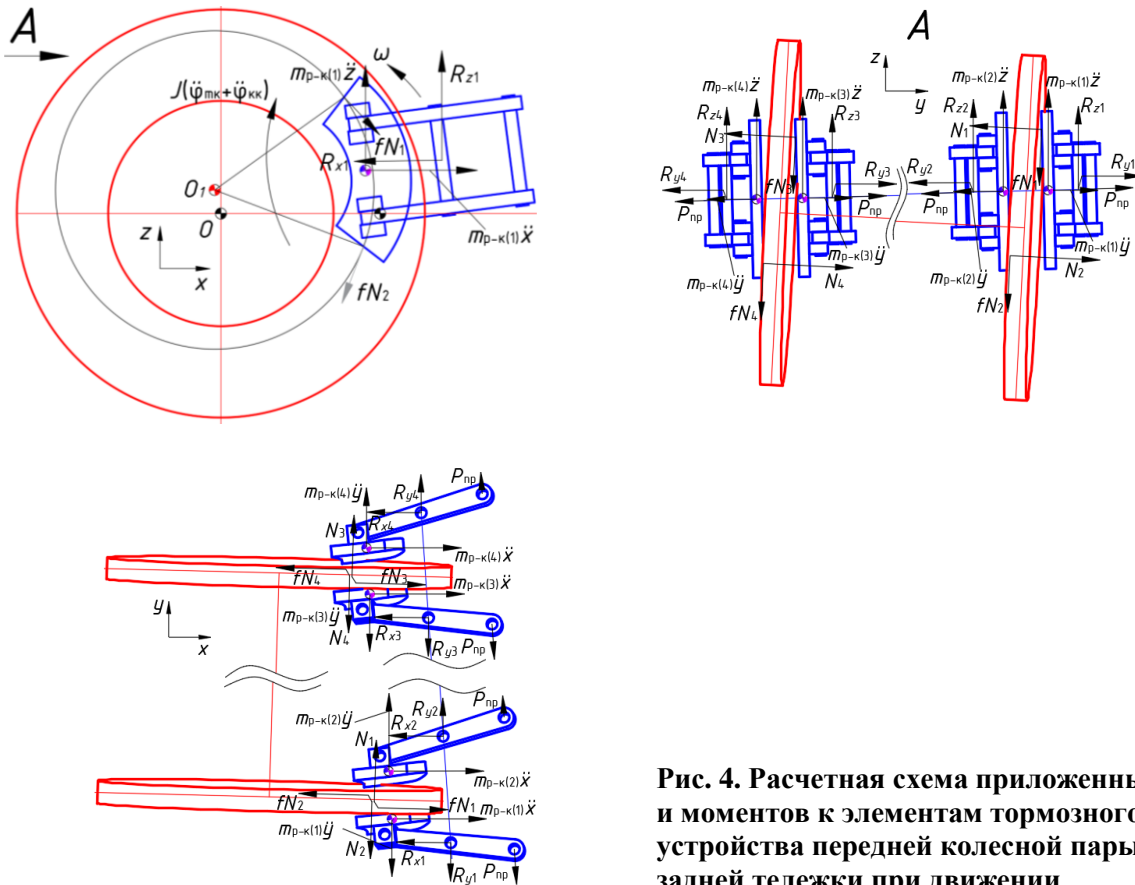
Рис. 3. Расчетная схема приложенных сил и моментов к элементам тормозного устройства задней колесной пары передней тележки при движении на кривом участке пути

$$N_{1(3)} = \begin{bmatrix} J_{p-k(3)} (\ddot{\varphi}_{TK} + \ddot{\varphi}_{KK}) + m_{p-k(1(3))} \ddot{z} L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT} - m_{p-k(1(3))} \ddot{x} L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} + \\ + P_{np} \sin \varphi_{KT} \sin \varphi_{TT} (L_p \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT} - L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT}) + \\ + P_{np} \sin \varphi_{PT} \cos \varphi_{TT} (L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} - L_p \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$= \begin{bmatrix} -(\sin \varphi_{po} \cos \varphi_{TT} - f \cos \varphi_{po} \sin [\Theta_k - \varphi_{TT}]) \left( \begin{bmatrix} \rho_k \sin (\Theta_k - \varphi_{TT}) \cos \varphi_{KT} + \Delta z_{um1(3)} \\ (\rho_{um} \cos \varphi_{PT} + L_o \cos \Theta_p) \sin \varphi_{TT} - \Delta z_{um1} \end{bmatrix} + \right) \\ +(\sin \varphi_{ko} \sin \varphi_{TT} + f \cos \varphi_{ko} \cos [\Theta_k - \varphi_{TT}]) \left( \begin{bmatrix} (\rho_{um} \cos \varphi_{PT} + L_o \cos \Theta_p) \cos \varphi_{TT} + \Delta x_{um1(3)} \\ -\rho_k \cos (\Theta_k - \varphi_{TT}) \cos \varphi_{PT} + \Delta x_{um1(3)} \end{bmatrix} - \right) \end{bmatrix}$$

$$N_{2(4)} = \left[ \begin{array}{l} J_{p-k(2(4))} (\ddot{\varphi}_{TK} + \ddot{\varphi}_{KK}) + m_{p-k(2(4))} \ddot{z} L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT} - m_{p-k(2(4))} \ddot{x} L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} + \\ + P_{np} \sin \varphi_{KT} \sin \varphi_{TT} (L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT} - L_p \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT}) + \\ + P_{np} \sin \varphi_{PT} \cos \varphi_{TT} (L_p \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} - L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT}) \end{array} \right] \quad (7)$$

$$= \left[ \begin{array}{l} (f \cos \varphi_{KO} \cos (\Theta_K + \varphi_{TT}) - \sin \varphi_{KO} \sin \varphi_{TT}) \left( \left[ \begin{array}{l} (\rho_{UM} \cos \varphi_{PT} + L_o \cos \Theta_p) \cos \varphi_{TT} + \Delta x_{UM2(4)} \\ - [\rho_K \cos (\Theta_K + \varphi_{TT}) \cos \varphi_{PT} + \Delta x_{UM2(4)}] \end{array} \right] - \right) + \\ + (f \cos \varphi_{PO} \sin [\Theta_K + \varphi_{TT}] - \sin \varphi_{PO} \cos \varphi_{TT}) \left( \left[ \begin{array}{l} (\rho_{UM} \cos \varphi_{PT} + L_o \cos \Theta_p) \sin \varphi_{TT} - \Delta z_{UM2(4)} \\ - [\rho_K \sin (\Theta_K + \varphi_{TT}) \cos \varphi_{KT} - \Delta z_{UM2(4)}] \end{array} \right] - \right) \end{array} \right]$$



**Рис. 4.** Расчетная схема приложенных сил и моментов к элементам тормозного устройства передней колесной пары задней тележки при движении на кривом участке пути

Нормальные силы для нечетной и четной сторон фрикционного узла:

$$N_{1(3)} = \left[ \begin{array}{l} J_{p-k(1(3))} (\ddot{\varphi}_{TK} + \ddot{\varphi}_{KK}) + m_{p-k(1(3))} \ddot{z} L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT} - m_{p-k(1(3))} \ddot{x} L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} + \\ + P_{np} \sin \varphi_{KT} \sin \varphi_{TT} (L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT} - L_p \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT}) + \\ + P_{np} \sin \varphi_{PT} \cos \varphi_{TT} (L_p \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} - L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT}) \end{array} \right] \quad (8)$$

$$= \left[ \begin{array}{l} (\sin \varphi_{PO} \cos \varphi_{TT} + f \cos \varphi_{PO} \sin [\Theta_K + \varphi_{TT}]) \left( \left[ \begin{array}{l} (\rho_{UM} \cos \varphi_{PT} + L_o \cos \Theta_p) \sin \varphi_{TT} + \Delta z_{UM1(3)} \\ [\rho_K \sin (\Theta_K + \varphi_{TT}) \cos \varphi_{KT} + \Delta z_{UM1(3)}] \end{array} \right] - \right) + \\ + (f \cos \varphi_{KO} \cos [\Theta_K + \varphi_{TT}] - \sin \varphi_{KO} \sin \varphi_{TT}) \left( \left[ \begin{array}{l} (\rho_{UM} \cos \varphi_{PT} + L_o \cos \Theta_p) \cos \varphi_{TT} - \Delta x_{UM1(3)} \\ [\rho_K \cos (\Theta_K + \varphi_{TT}) \cos \varphi_{PT} - \Delta x_{UM1(3)}] \end{array} \right] - \right) \end{array} \right]$$

$$N_{2(4)} = \frac{\left[ \begin{aligned} & J_{p-k(2(4))} (\ddot{\varphi}_{TK} + \ddot{\varphi}_{KK}) + m_{p-k(2(4))} \ddot{z} L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT} - m_{p-k(2(4))} \ddot{x} L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} + \\ & + P_{np} \sin \varphi_{KT} \sin \varphi_{TT} (L_p \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT} - L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT}) + \\ & + P_{np} \sin \varphi_{PT} \cos \varphi_{TT} (L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} - L_p \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT}) \end{aligned} \right]}{\left[ \begin{aligned} & \left( \sin \varphi_{KO} \sin \varphi_{TT} + f \cos \varphi_{KO} \cos [\Theta_K - \varphi_{TT}] \right) \left( \left[ \left( \rho_{UM} \cos \varphi_{PT} + L_o \cos \Theta_p \right) \cos \varphi_{TT} - \Delta x_{UM2(4)} \right] - \right. \\ & \left. - \left[ \left( \rho_K \cos [\Theta_K - \varphi_{TT}] \cos \varphi_{PT} \right) - \Delta x_{UM2(4)} \right] \right) - \\ & - \left( \sin \varphi_{PO} \cos \varphi_{TT} + f \cos \varphi_{PO} \sin [\Theta_K - \varphi_{TT}] \right) \left( \left[ \left( \rho_{UM} \cos \varphi_{PT} + L_o \cos \Theta_p \right) \sin \varphi_{TT} - \Delta z_{UM2(4)} \right] + \right. \\ & \left. + \left[ \rho_K \sin (\Theta_K - \varphi_{TT}) \cos \varphi_{KT} - \Delta z_{UM2(4)} \right] \right) \end{aligned} \right]}. \quad (9)$$

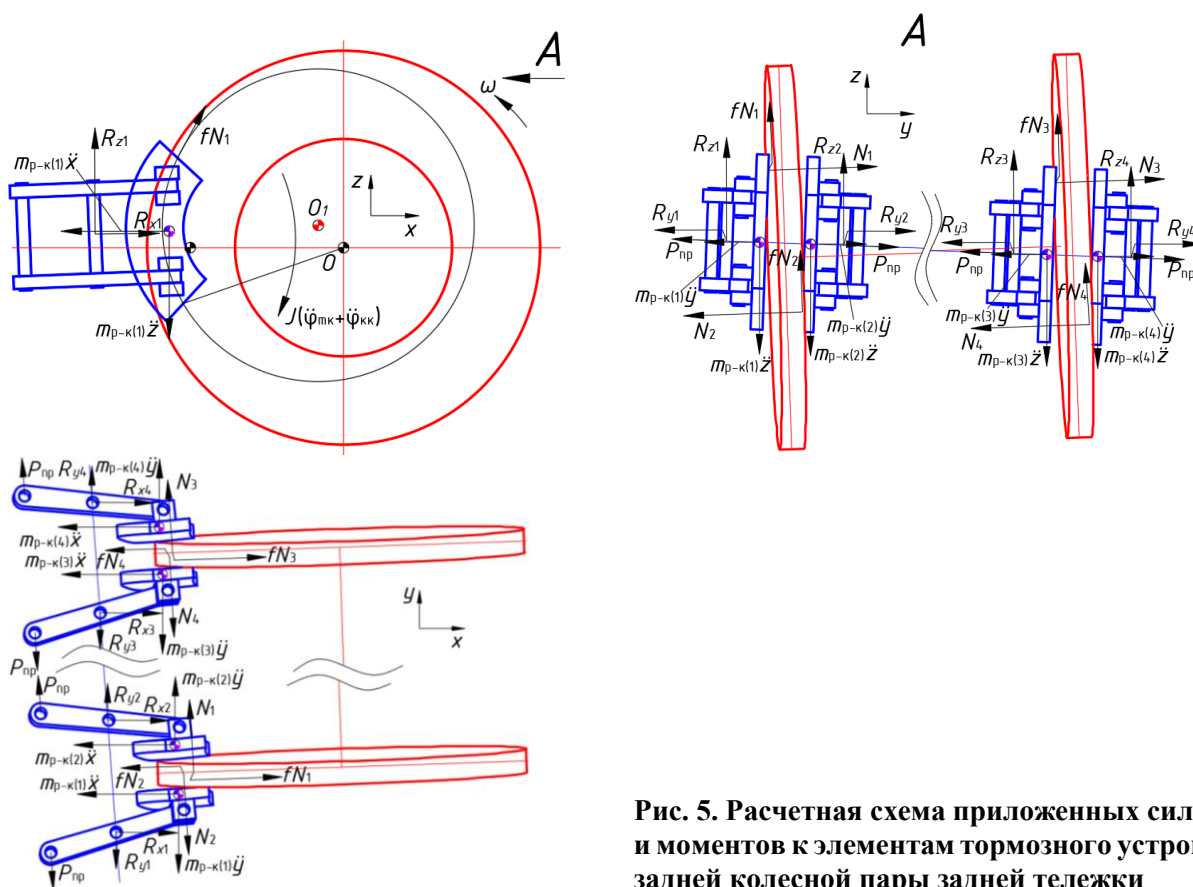


Рис. 5. Расчетная схема приложенных сил и моментов к элементам тормозного устройства задней колесной пары задней тележки при движении на кривом участке пути

$$N_{1(3)} = \frac{\left[ \begin{aligned} & J_{p-k(1(3))} (\ddot{\varphi}_{TK} + \ddot{\varphi}_{KK}) + m_{p-k(1(3))} \ddot{z} L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT} + m_{p-k(1(3))} \ddot{x} L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} + \\ & + P_{np} \sin \varphi_{KT} \sin \varphi_{TT} (L_p \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT} - L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT}) + \\ & + P_{np} \sin \varphi_{PT} \cos \varphi_{TT} (L_p \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} - L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT}) \end{aligned} \right]}{\left[ \begin{aligned} & \left( f \cos \varphi_{PO} \sin [\Theta_K - \varphi_{TT}] - \sin \varphi_{PO} \cos \varphi_{TT} \right) \left( \left[ \Delta z_{UM1(3)} - \left( \rho_{UM} \cos \varphi_{PT} + L_o \cos \Theta_p \right) \sin \varphi_{TT} \right] - \right. \\ & \left. - \left[ \rho_K \sin [\Theta_K - \varphi_{TT}] \cos \varphi_{KT} + \Delta z_{UM1(2)} \right] \right) + \\ & + \left( \sin \varphi_{KO} \sin \varphi_{TT} + f \cos \varphi_{KO} \cos [\Theta_K - \varphi_{TT}] \right) \left( \left[ \left( \rho_{UM} \cos \varphi_{PT} + L_o \cos \Theta_p \right) \cos \varphi_{TT} + \Delta x_{UM1(3)} \right] - \right. \\ & \left. - \left[ \rho_K \cos (\Theta_K - \varphi_{TT}) \cos \varphi_{PT} + \Delta x_{UM1(3)} \right] \right) \end{aligned} \right]}. \quad (10)$$

$$N_{2(4)} = \frac{\left[ \begin{aligned} & J_{p-k(2(4))} (\ddot{\varphi}_{TK} + \ddot{\varphi}_{KK}) + m_{p-k(2(4))} \ddot{z} L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT} + m_{p-k(2(4))} \ddot{x} L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} + \\ & + P_{pp} \sin \varphi_{KT} \sin \varphi_{TT} (L_o \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT} - L_p \cos \Theta_p \cos \varphi_{TT}) + \\ & + P_{pp} \sin \varphi_{PT} \cos \varphi_{TT} (L_p \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT} - L_o \cos \Theta_p \sin \varphi_{TT}) \end{aligned} \right]}{\left( f \cos \varphi_{KO} \cos [\Theta_K + \varphi_{TT}] - \sin \varphi_{KO} \sin \varphi_{TT} \right) \left( \left[ \begin{aligned} & \left[ (\rho_{IM} \cos \varphi_{PT} + L_o \cos \Theta_p) \cos \varphi_{TT} + \Delta x_{IM2(4)} \right] - \\ & - \left[ (\rho_K \cos [\Theta_K - \varphi_{TT}] \cos \varphi_{PT}) + \Delta x_{IM2(4)} \right] \end{aligned} \right] \right) -} \cdot \quad (11)$$

$$\left( \sin \varphi_{PO} \cos \varphi_{TT} - f \cos \varphi_{PO} \sin [\Theta_K + \varphi_{TT}] \right) \left( \left[ \begin{aligned} & \left[ \Delta z_{IM2(4)} - (\rho_{IM} \cos \varphi_{PT} + L_o \cos \Theta_p) \sin \varphi_{TT} \right] + \\ & + \left[ \rho_K \sin (\Theta_K - \varphi_{TT}) \cos \varphi_{KT} + \Delta z_{IM2(4)} \right] \end{aligned} \right] \right)$$

Отличия каждой из осей заключаются в величине и направлении смещения центра окружности приложения нормальных сил и направлениях тангенциальных сил. Учитывая зависимости (4–10), необходимо рассчитывать тормозную силу (1) для каждого вагона электропоезда следующим образом:

$$B_T = \sum_{i=1}^n f N_i r_i / R, \quad (12)$$

где  $\sum_{i=1}^n N_i r_i$  – сумма произведений всех  $i$ -х нормальных сил на радиус их приложения, Нм.

### Заключение

Проведенное исследование позволяет скорректировать процесс расчета для тормозного оборудования подвижного состава для участков со сложным рельефом. Рассматривая данные особенности смещения центров давления во фрикционных узлах, возможно учитывать неравномерность вклада каждой колодки тормозных устройств дисково-колодочного типа в общую тормозную силу, образованную тормозным оборудованием всего подвижного состава. Полученные зависимости дают возможность учитывать влияние технических характеристик подвески тележек на величину неравномерности нормальных и тангенциальных сил как вагона в целом, так и для каждой отдельной колесной пары. На основании проведенного исследования можно сформулировать два возможных направления решения выявленной проблемы: увеличение жесткости подвески вагона, что повлечет ухудшение комфортабельности перевозки пассажиров, и усовершенствование конструкции тормозных устройств, что позволит выровнять нормальные силы по площади тормозных колодок и снизить неравномерность вклада каждой колодки колесных пар вагона подвижного состава.

### Список литературы

- 1 Иванов, П. Ю. Реверсивный инжиниринг в исследовании элементов тормозных систем / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, Д. О. Емельянов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3 (59). – С. 80–86. – DOI 10.20291/2079-0392-2023-3-80-86.
- 2 Концепция альтернативной тормозной системы для подвижного состава / В. Е. Иноземцев, Д. Г. Евсеев, М. Ю. Куликов, А. В. Барышников // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 10 (10). – С. 42–48. – DOI 10.30987/2782-5957-2022-10-42-48.
- 3 Сравнение длины тормозных путей грузового поезда с однотрубным и двухтрубным питанием тормозной системы / Д. В. Осипов, П. Ю. Иванов, А. А. Хамнаева, К. Е. Пронин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2024. – Т. 21, № 1. – С. 156–168. – DOI 10.20295/1815-588X-2024-01-156-168.

### References

- 1 Ivanov, P. Yu. Reverse engineering in the study of brake system elements / P. Yu. Ivanov, E. Yu. Dulsky, D. O. Yemelyanov // Herald of the Ural state university of railway transport. – 2023. – No. 3 (59). – P. 80–86. – DOI 10.20291/2079-0392-2023-3-80-86.
- 2 The concept of an alternative braking system for rolling stock / V. E. Inozemtsev, D. G. Evseev, M. Y. Kulikov, A.V. Baryshnikov // Transport engineering. – 2022. – No. 10 (10). – P. 42–48. – DOI 10.30987/2782-5957-2022-10-42-48.
- 3 Comparison of the length of the braking tracks of a freight train with single-tube and double-tube brake system power supply / D. V. Osipov, P. Yu. Ivanov, A. A. Khamnaeva, K. E. Pronin // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2024. – Vol. 21, No. 1. – P. 156–168. – DOI 10.20295/1815-588X-2024-01-156-168.

4 Устранение клинового износа фрикционных накладок в клещевом механизме тормозного блока дискового тормоза для железнодорожного транспорта / В. А. Карпычев, В. Я. Солодилов, А. А. Курочкин, А. А. Мошков // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 4. – С. 181–185. – ISSN 2079-5920.

5 **Sawczuk, W.** Diagnostics of the railway friction disc brake based on the analysis of the vibration signals in terms of resonant frequency / W. Sawczuk, G. M. Szymański // Arch Appl Mech. – 2017. – Vol. 87. – P. 801–815. – DOI 10.1007/s00419-016-1202-0.

6 **Landström, E. V.** Thermomechanics of tread braking : thesis for the degree of doctor of philosophy in solid and structural mechanics / E. V. Landström. – Gothenburg, Sweden, 2024. – 120 p.

7 **Bodare, J.** Review on the study of abnormal braking in trains / J. Bodare, S. B. ManeDeshmukh // International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 5. – P. 189–195.

8 **Mickoski, H.** Investigation of self-excited vibrations in tread brake unit for railway vehicles / H. Mickoski, I. Mickoski, and F. Zdraveski // Journal of Vibroengineering. – Sep. 2016. – Vol. 18, No. 6. – P. 3881–3890. – DOI 10.21595/jve.2016.16914.

9 **Поляков, П. А.** Определение положения центра давления в системе «прижимающий элемент – тормозная колодка – тормозной диск» / П. А. Поляков // Транспортное, горное и строительное машиностроение : наука и производство. – 2022. – № 16. – С. 62–69. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-16-62-69.

4 Elimination of wedge wear of friction linings in the pincer mechanism of the disc brake block for railway transport / V. A. Karpychev, V. Ya. Solodilov, A. A. Kurochkin, A. A. Moshkov // Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. – 2013. – No. 4. – P. 181–185. – ISSN 2079-5920.

5 **Sawczuk, W.** Diagnostics of the railway friction disc brake based on the analysis of the vibration signals in terms of resonant frequency / W. Sawczuk, G. M. Szymański // Arch Appl Mech. – 2017. – Vol. 87. – P. 801–815. – DOI 10.1007/s00419-016-1202-0.

6 **Landström, E. V.** Thermomechanics of tread braking : thesis for the degree of doctor of philosophy in solid and structural mechanics / E. V. Landström. – Gothenburg, Sweden, 2024. – 120 p.

7 **Bodare, J.** Review on the study of abnormal braking in trains / J. Bodare, S. B. ManeDeshmukh // International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 5. – P. 189–195.

8 **Mickoski, H.** Investigation of self-excited vibrations in tread brake unit for railway vehicles / H. Mickoski, I. Mickoski, and F. Zdraveski // Journal of Vibroengineering. – Sep. 2016. – Vol. 18, No. 6. – P. 3881–3890. – DOI 10.21595/jve.2016.16914.

9 **Polyakov, P. A.** Determination of the position of the pressure center in the system “clamping element – brake pad – brake disc” / P. A. Polyakov // Transport, mining and construction engineering : science and production. – 2022. – No. 16. – P. 62–69. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-16-62-69.

*S. N. Korzhov, P. A. Polyakov, I. A. Yaitskov*

#### **A METHOD FOR CALCULATING NORMAL AND TANGENTIAL FORCE FACTORS IN BRAKING DEVICES WITH A PINCER MECHANISM WHILE AN ELECTRIC TRAIN OPERATING ON CURVE TRACK SECTIONS**

**Abstract.** Increasing the speed of rolling stock to transport passenger traffic imposes additional responsibility on safety systems. Calculation methods for modern rolling stock braking equipment average the technical characteristics of the braking system and do not take into account movement on curved track sections, when the effectiveness of the braking devices is minimal. The conducted research makes it possible to adjust the calculation process for rolling stock braking equipment for areas with difficult terrain. By considering these characteristics of the shift in pressure centers in the friction units, it is possible to take into account the uneven contribution of each brake pad of disc-and-shoe brakes to the overall braking force of the entire rolling stock. The obtained dependences make it possible to account for the influence of bogie suspension characteristics on the magnitude of the unevenness of normal and tangential forces for both the wagon as a whole and for each individual wheelset.

Based on the conducted research, two possible solutions to the identified problem can be formulated: increasing the rigidity of the carriage suspension, which will lead to a deterioration in passenger transportation comfort, and improving the design of braking devices, which will

allow to equalize normal forces over the area of the brake pads and reduce the uneven contribution of each pad of the rolling stock wheelsets.

**Keywords:** braking, braking device, pincer mechanism, normal force, normal and tangential forces.

**For citation:** Korzhov, S. N. A method for calculating normal and tangential force factors in braking devices with a pincer mechanism while an electric train operating on curve track sections / S. N. Korzhov, P. A. Polyakov, I. A. Yaitskov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 110–120. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_110.

#### Сведения об авторах

##### **Коржов Сергей Николаевич**

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

##### **Поляков Павел Александрович**

Набережночелнинский институт Казанского  
федерального университета (НЧИ КФУ),  
кафедра «Механика и конструирование»,  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой,  
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

##### **Яицков Иван Анатольевич**

Ростовский государственный университет  
путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,  
доктор технических наук, профессор,  
декан электромеханического факультета,  
e-mail: yia@rgups.ru

#### Information about the authors

##### **Korzhov Sergey Nikolaevich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair “Life Safety”,  
Postgraduate Student,  
e-mail: ksn@engcenter.ru

##### **Polyakov Pavel Alexandrovich**

Naberezhnye Chelny Institute of Kazan  
Federal University (NChI KFU),  
Chair “Mechanics and Engineering”,  
Doctor of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
Head of the Chair,  
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

##### **Yaitskov Ivan Anatolievich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair “Car and Car Facilities”,  
Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Dean of the Electromechanical Department,  
e-mail: yia@rgups.ru

*А. К. Пляскин, А. А. Потапов*

## СПОСОБЫ РАЗГРАНИЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ЛОКОМОТИВОВ

**Аннотация.** Рассмотрена проблема разграничения технических состояний (ТС) локомотивов. Разделение и идентификация ТС – один из основных инструментов технической диагностики, основой которого является теория распознавания образов. Приведены примеры разделения ТС (образов) из нормативно-технической базы в сфере надёжности, примеры ТС устройств ЖАТ и СЦБ, пример ТС из сферы энергетики, а также виды групп риска (состояний) работников локомотивных бригад. Из представленного сравнения выявлено, что для отдельных деталей и узлов локомотива существуют более детальные способы разграничения ТС, нежели для всего локомотива в целом, несмотря на его сложность и принцип супераддитивности (система сложнее суммы её частей).

Оценена эффективность существующей методики распределения локомотивов по группам риска. При использовании существующей методики из-за большого количества локомотивов группы риска ремонтный комплекс не сможет выполнить указанный объем работ в связи с наличием планов технического обслуживания и ремонта (ТОиР) и выполнения неплановых ремонтов.

С целью совершенствования характера эксплуатации и ТОиР локомотивов предлагается несколько новых способов разграничения их ТС: с помощью наивного байесовского классификатора на основе показателей надёжности, с помощью оценки отклонения эксплуатационных (рабочих) параметров локомотива от норматива, комбинированный способ.

**Ключевые слова:** управление парком локомотивов, техническое состояние, рисковое состояние, байесовский классификатор, критерий.

**Для цитирования:** Пляскин, А. К. Способы разграничения технических состояний локомотивов / А. К. Пляскин, А. А. Потапов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 121–134. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_121.

### **Введение**

Вопрос ранжирования (разделения) технических состояний машин и механизмов, объектов транспорта и энергетики является крайне значимым для бесперебойного функционирования производственных комплексов. Внезапный отказ оборудования всегда приводит к простоям, убыткам, нарушению технологического процесса. Тяговый подвижной состав – локомотивы – и локомотивное хозяйство в целом являются самым капиталоемким хозяйством ОАО «РЖД», в связи с этим отказы локомотивов являются критически значимыми для функционирования железнодорожного транспорта. Путем своевременного разграничения рискованных технических состояний локомотивов возможно усовершенствовать работу транспорта и повысить безотказность перевозочного процесса. Поэтому целью настоящей работы является разработка и обоснование способов разграничения технических состояний локомотивов, обеспечивающих своевременную идентификацию рискованных состояний и направленных на повышение безотказности перевозочного процесса, эффективности эксплуатации, технического обслуживания и ремонта (ТОиР).

На железнодорожном транспорте, как и в других сферах, применяется ГОСТ Р 27.102-2021 «Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения», который выделяет несколько бинарных состояний технического объекта: исправное/неисправное, работоспособное/неработоспособное, рабочее/нерабочее [1].

Деления состояний объекта на «исправное/неисправное» недостаточно, ввиду того что неисправное состояние может иметь различную степень «тяжести» (легкие повреждения, не влияющие на выполнение техническим объектом своих функций, или же тяжелые – снижающие эффективность его использования). Поэтому выделяют дополнительные состояния, такие как «работоспособное/неработоспособное», предельное [2]. Кроме того, стандарт [1] содержит следующее примечание: «Для сложных объектов возможно деление их неработоспособных состояний. При этом из множества неработоспособных состояний выделяют частично неработоспособные состояния, в которых объект способен частично выполнять требуемые функции». Таким образом, возможно выделение нескольких частично

неработоспособных состояний между работоспособным и неработоспособным состояниями технического объекта по степени деградации технического объекта или степени реализации им своих функций.

Дополнительно во множестве неработоспособных состояний выделяют защитные и опасные состояния. Неработоспособные защитные состояния снижают вероятность развития опасного отказа, неработоспособные опасные наоборот – увеличивают [2]. Также существует работоспособное предотказное состояние – такое работоспособное состояние объекта, когда хотя бы один из параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, достигает граничного значения, определенного нормативно-технической и (или) конструкторской документацией, при котором не может быть гарантирована работоспособность объекта при дальнейшем изменении данного параметра.

### Основная часть

Если обратиться к нормативной базе по управлению и содержанию парком локомотивов, а именно инструкции по учёту локомотивов, утверждённой распоряжением ОАО «РЖД» от 29 октября 2012 года N 2155р [3], выяснится, что локомотивы делятся на эксплуатируемый парк (который подразделяется на рабочий и нерабочий парки) и неэксплуатируемый парк.

Согласно инструкции [3] локомотив может находиться только в одной из категорий инвентарного парка. Локомотивы рабочего парка делятся по виду выполняемой работы (поездная, маневровая и прочая). Локомотивы нерабочего парка подразделяются на: перемещаемые без участия в тяге, ожидающие перемещения для выполнения ТОиР, ожидающие работу на станционных путях и т.д. Локомотивы, требующие непланового ремонта (НР), в зависимости от технического состояния, относят либо к нерабочему, либо к неэксплуатируемому паркам. Главная характеристика рабочего парка – все локомотивы в его составе задействованы при проведении работы. Основным критерий перехода в категорию нерабочего/неэксплуатируемого парка по техническому состоянию – факт отказа или приближение срока планового ТОиР. Других способов разделения технических состояний в инструкции [3] не предусмотрено.

Структура инвентарного парка приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структура инвентарного парка ОАО «РЖД» [3]

Однако в ОАО «РЖД» применяется как минимум один способ разграничения технического состояния локомотивов рабочего парка – это зачисление отдельных тяговых единиц в группу риска (порядок утверждён распоряжением ОАО «РЖД» от 20.12.2022 г. № 3383/р [4]). В группу риска включаются локомотивы, допустившие три и более отказов технических средств (ОТС) 1-й или 2-й категорий после планового ремонта или обслуживания либо пяти неплановых ремонтов (за исключением превышения норм простоя на ТО-2).

Локомотив группы риска принимается в эксплуатацию после ремонта в ходе комиссионного осмотра; может быть размещён вне очереди для проведения крупных видов ремонта с минимально допустимым пробегом; при зачислении локомотива в группу риска сервисная компания получает уведомление об этом и обязана восстановить его работоспособность при поступлении в сервисное депо. Локомотив выводится из группы риска при положительном решении всех членов комиссии и затем находится 30 суток на испытательном сроке. Также локомотивы группы риска отмечаются красной отметкой в ЕК АСУТ [4].

Таким образом, фактически существуют два вида классификации состояния локомотивов по два состояния на каждую. Сведем данные о них в таблицу 1.

Таблица 1

## Классификация состояний локомотивного парка

№	Вид классификации	№	Состояние	Обозначение в ЕК АСУТ	Критерий отнесения к состоянию
1	По возможности использования для тяги поездов	1	В рабочем парке или в нерабочем парке (ожидает работу)	Не предусмотрено	Локомотив в работе (реализует тягу поездов) или возможно прямо сейчас поставить локомотив под поезд
		2	Вне рабочего парка		Локомотив передислоцируется в «холодном» состоянии, на плановом/неплановом ремонте
2	По риску эксплуатации	1	Вне группы риска	Не выделяется	Количество ОТС 1, 2 кат. < 3 или количество НР < 5
		2	В группе риска	Красная маркировка	Количество ОТС 1, 2 кат. ≥ 3 или количество НР ≥ 5

Существует ГОСТ 33943-2016 «Межгосударственный стандарт. Надежность железнодорожного тягового подвижного состава. Термины и определения», который содержит следующие виды состояний тягового подвижного состава: исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное, опасное, предельное. Однако, как видно из табл. 1 и нормативно-технической документации [3, 4], в эксплуатации применяется более узкая классификация.





При этом первый вид классификации из табл. 1 не ранжирует парк локомотивов по техническому состоянию, так как в неэксплуатируемом парке могут быть как неисправные, так и исправные локомотивы, а в эксплуатируемом нерабочем – исправные, работоспособные, неисправные одновременно. Второй вид классификации табл. 1 фактически разграничивает только две группы локомотивов. Локомотивы группы риска должны подвергаться более детальному контролю при ТОиР и приемке, а также после вывода из группы риска.

Дополнительно отметим следующее: исходя из логики действующих нормативно-технических документов по эксплуатации парка локомотивов (инструкции [3] или приказов Дирекции тяги, определяющих нормы масс и длин поездов на железных дорогах РФ, например, приказ от 10 апреля 2024 г. № ЦТ-51 для Дальневосточной железной дороги) фактически принято, что локомотивы взаимозаменяемы и идентичны по своему техническому состоянию как в пределах одной серии, так и всего парка.

Разграничение различных технических состояний локомотивов предусматривается не только нормативной документацией, но и функционалом программного обеспечения (ПО) бортовых микропроцессорных систем управления и диагностики (МПСУиД). Так, МПСУиД, применяемое на тепловозах серии ТЭМ9, предусматривает несколько цветографических обозначений, выводимых на монитор на пульте управления машиниста в зависимости от неисправности и степени её тяжести, а также приоритетность ТОиР по виду сообщения в соответствии с табл. 2 [5].

Таблица 2

## Виды и приоритеты диагностических сообщений МПСУиД ТЭМ9 [5]

Обозначение	Приоритет	Тип неисправности	Значение
	1	Серьезная неисправность	Необходим вызов вспомогательного локомотива
–	2	–	При первой возможности необходим ремонт в условиях депо
	3	Предупредительные сообщения	Завершить текущую поездку в соответствии с графиком. При заходе в депо сделать запись о необходимости выполнения внепланового ТО
	4	Предупредительные сообщения	Внеплановое техобслуживание не требуется
	5	Информационные сообщения	Информирование локомотивной бригады

Для электровозов серии 2ЭС6 в МПСУиД предусмотрены иная градация диагностических сообщений в части ограничений по эксплуатации, представленная в табл. 3, и градация классов ограничений для отказов отдельных видов оборудования или узлов, представленная в табл. 4. В соответствии с документацией на электровоз 2ЭС6 диагностические сообщения могут выдаваться как машинисту, так и в радиоканал или в архив. Диагностические сообщения, кроме кода, приоритета, сообщения и рекомендации машинисту, имеют обозначение вида «D-0», где первый символ обозначает класс ограничения эксплуатации, а второй символ – группу ограничений [6, 7].

Таблица 3

**Группы ограничений по эксплуатации электровоза 2ЭС6 [6]**

Номер группы	Цветовая маркировка группы в МПСУиД	Значение
0		Нет ограничений
1		Требуется ремонт на ТО-2
2		Требуется заход в ремонтное депо

Таблица 4

**Классы ограничений эксплуатации электровоза 2ЭС6 [7]**

Класс	Маркировка класса	Значение
A		Отказ, приводящий к невозможности дальнейшего движения
B		Отказ с возможностью устранения путем повторного включения
C		Отказ, ограничивающий характеристики локомотива
D		Предупреждение без ограничений

В ООО «СТМ-Сервис», выполняющей ТОиР локомотивов АО «СТМ», применяется специализированное ПО «Ситуационный центр ООО «СТМ-Сервис», которое использует представленную выше классификацию ограничений по эксплуатации электровозов [8].

При этом указанные классификации технических состояний тепловозов и электровозов являются решением завода-изготовителя, а не установлены нормативно.

Ранжирование различных состояний, введение градаций используется повсеместно в технической сфере и является базовым инструментом технической диагностики, а также методов управления оборудованием и активами. Этот инструмент активно применяется и в других отраслях. Известно, что одним из оснований технической диагностики является теория распознавания образов, причем в условиях ограниченности информации о состоянии технических объектов. В этом плане, а также по используемым методам техническая диагностика очень близка к медицинской диагностике [9]. Ввиду широкого охвата проблематики разделения состояний и распознавания образов, рассмотрим альтернативные виды разделения состояний – методику разделения состояний работников локомотивных бригад, методику оценки технического состояния в энергетике, методику разделения технических состояний устройств ЖАТ и СЦБ, и сравним их с методиками разделения состояния локомотивов.

В локомотивном хозяйстве выделяются так называемые группы риска работников локомотивных бригад. Для них существует два вида классификации групп риска – по профессиональным компетенциям (результатам работы) и по психофизиологическим показателям. В настоящее время в Системе оценки уровня знаний работников локомотивного комплекса ОАО «РЖД» (АСПТ) реализовано распределение работников локомотивных бригад по группам риска: от незначительного риска до недопустимого (критического) риска по критериям, представленным в табл. 5 [10]. Методика распределения работников по группам риска основывается на критериях отнесения к группам риска в соответствии с Положением о машинисте-инструкторе локомотивных бригад Дирекции тяги, утвержденном распоряжением ОАО «РЖД» от 9 апреля 2018 г. № 707/р [11].

Таблица 5

**Критерии отнесения работников локомотивных бригад к группе риска по результатам их работы [10]**

№	Риск	Уровень	Критерий отнесения к группе риска	
1	Незначительный	Зеленый	И	Нет нарушений в АСУТ-НБД
				Нет нарушений на тренажере
				Тест АСПТ сдан >65 баллов
2	Допустимый (несущественный)	Жёлтый	ИЛИ	Есть 2 или 3 негрубых нарушений в АСУТ-НБД, но тест АСПТ сдан >65 баллов
				Нет грубых нарушений в АСУТ-НБД, но есть 2÷5 негрубых нарушений на тренажёре
				Отсутствуют нарушения, тренажёр пройден, и тест АСПТ ≤65 баллов
3	Нежелательный (существенный)	Оранжевый	ИЛИ	Есть 2÷3 негрубых нарушений в АСУТ-НБД
				1 грубое нарушение на тренажёре
				Тест в АСПТ сдан ≤65 баллов
4	Недопустимый (критический)	Красный	1 грубое нарушение в АСУТ-НБД	

Распределение работников локомотивных бригад по группам риска по психофизиологическим показателям ранее производилось в соответствии с Методикой формирования групп риска работников локомотивных бригад по медицинским и психофизиологическим показателям [12], действовавшей с 2011 по 2018 годы, в соответствии с табл. 6. Количество баллов определялось путем их суммирования в случае наличия факторов риска.

Таблица 6

**Критерии отнесения работников локомотивных бригад к группам риска по психофизиологическим показателям [12]**

№	Риск	Число баллов	Периодичность осмотров
1	Незначительный	1–40	При каждой ВЭК
2	Умеренный	41–450	Ежегодно (по показаниям – чаще)
3	Высокий	451–2250	Ежегодно
4	Очень высокий	Свыше 2551	Не реже 1 раза в 6 месяцев

В настоящее время вместо методики [12] применяется Порядок формирования группы риска работников локомотивных бригад ОАО «РЖД» по психофизиологическим показателям, утверждённый распоряжением ОАО «РЖД» от 12 октября 2018 г. № 2228/р. Данный порядок ввёл одну группу риска, подразделяющуюся на несколько категорий по различным показателям, связанным с психологическим состоянием и здоровьем («неудовлетворительная адаптация», «срыв адаптации» и т.д.), а также определил возможность устанавливать индивидуальные нормы показателей психофизиологического здоровья для работников локомотивных бригад.

Также в ОАО «РЖД» используются Методические рекомендации по оценке психологической совместимости работников локомотивных бригад ОАО «РЖД». Данные рекомендации направлены на включение в состав локомотивных бригад работников, взаимодополняющих друг друга своими компетенциями и навыками для совершенствования процесса эксплуатации локомотивов [13].

Альтернативный вид ранжирования по техническому состоянию уже применяется в сфере энергетики в соответствии с Методикой оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей, утвержденной приказом Минэнерго РФ от 26 июля 2017 г. № 676. Данная методика определяет порядок расчёта индекса технического состояния различных энергетических объектов (ЛЭП, трансформаторное оборудование и др.), а также виды технического воздействия для каждого диапазона индекса технического состояния. Диапазоны индекса технического состояния приведены в табл. 7.

Таблица 7

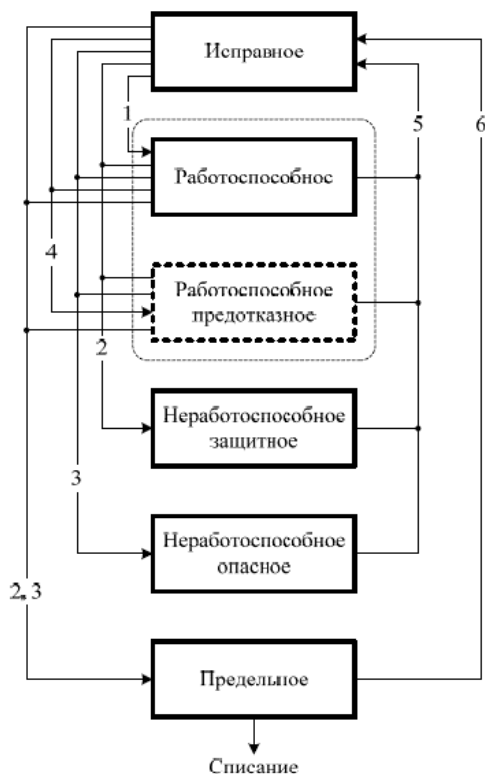
**Диапазоны индекса технического состояния объектов энергетики [14]**

Диапазоны индекса технического состояния	Вид технического состояния	Визуализация (цвет)	Вид технического воздействия
$\leq 25$	Критическое	Красный	Вывод из эксплуатации
$25 < i \leq 50$	Неудовлетворительное	Оранжевый	Дополнительные ТОиР усиленный контроль тех. состояния, тех. перевооружение
$50 < i \leq 70$	Удовлетворительное	Желтый	Усиленный контроль тех. состояния, капитальный ремонт, реконструкция
$70 < i \leq 85$	Хорошее	Зеленый	По результатам планового диагностирования
$85 < i \leq 100$	Очень хорошее	Зеленый	Плановое диагностирование

Если сравнить положения методики [14] с порядком [4], выявится, что перечень контрольных и ремонтных мероприятий для локомотивов предусмотрен для группы риска в целом; в свою очередь, в методике Минэнерго РФ для каждого технического состояния оборудования предусмотрены свои меры.

Для устройств ЖАТ и СЦБ применяют разделение на исправное, работоспособное, частично работоспособное, неработоспособное защитное, неработоспособное опасное, предельное состояния [2]. Данные состояния описывались во введении как часто используемые и для других технических объектов, однако именно для автоматики и электроники их применение наиболее оправдано и удобно за счёт возможности реализации программных, аппаратных защит, систем резервирования (холодный, горячий резерв) и других средств.

Классификация технических состояний и диаграмма перехода между ними для устройств ЖАТ и СЦБ приведена на рис. 2 [2].



**Рис. 2. Классификация состояний, диаграмма перехода между ними для ЖАТ и СЦБ:**

1 – повреждение; 2 – защитный отказ; 3 – опасный отказ; 4 – предотказ; 5 – ремонт;  
6 – капитальный ремонт

Для локомотивов, как сложных технических устройств, также характерны защитные отказы (благодаря наличию автоматических выключателей в цепях питания, реле заземления и других устройств), однако в используемой классификации технических состояний тягового подвижного состава (например, ГОСТ 33943-2016) отсутствуют неработоспособные защитные состояния. При этом ГОСТ 33943-2016 предусматривает исправное, работоспособное, неработоспособное, опасное, предельное состояния.

Парадоксально, но если для работников локомотивного хозяйства есть две независимые шкалы по оценке их состояния с точки зрения здоровья и профессиональных компетенций и ранее фактически применялось 8 категорий их состояния, существует нормативно закреплённый контроль их готовности к выполнению трудовых задач, а также учёт психологической совместимости составов бригад, если для отдельных серий локомотивов (2ЭС6 и т.д.) и отдельных отказов их оборудования предусмотрено 3 или 4 степени деградации состояния с рекомендациями по ТОиР, то для локомотивов в целом предусмотрено только две категории – наличие/отсутствие в группе риска по надёжности, не учитывается их техническое состояние для оценки готовности выполнения поставленных целей по перевозке грузов и пассажиров. Хотя, как известно из базовых положений системотехники, для сложных систем характерна супераддитивность – когда целое больше суммы частей [15]. Разделение технических состояний сложных технических объектов должно быть более детализированным и комплексным, нежели простая бинарная модель исправен/неисправен или работоспособен/неработоспособен. Такое разделение должно учитывать как рекомендации или предписания в части ТОиР, а также в части эксплуатации, так как такие сложные технические объекты, как локомотивы, в отличие от устройств ЖАТ, СЦБ и других являются не статичными, а динамическими объектами, внешние условия эксплуатации которых и рабочие режимы резко переменны и часто чередуются друг с другом. Поэтому представленная на рис. 2 диаграмма переходов технических объектов из одного состояния в другое лишь частично решает данную задачу ранжирования/разделения технических состояний, так как предусматривает только мероприятия ТОиР, без учёта особенностей эксплуатации, которые характерны для локомотивов. Описанный выше набор мероприятий по усиленному контролю состояния локомотивов и их ТОиР в соответствии с [4] также не является детализированным и сильно зависит от фактического состояния локомотива; при этом дополнительных мер по совершенствованию эксплуатации локомотивов группы риска также не предлагается.

Пример различных исходов эксплуатации локомотива в зависимости от эксплуатационных условий приводится в статье И. К. Лакина, А. П. Семенова [16], где приводится разбор последствий одного и того же отказа выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) электровазона серии 2ЭС5К в зависимости от условий поездки (массы поезда, величины подъёма). Если в момент отказа масса поезда является установленной, а подъём руководящим, предполагается большая вероятность того, что произойдет остановка поезда с необходимостью вызова вспомогательного локомотива, что будет зафиксировано как ОТС 1-й категории. При соблюдении только одного из двух условий в момент отказа ВИП (наличие руководящего подъёма или поезда установленной весовой нормы) предполагается снижение установленных характеристик локомотива, как следствие задержка поезда и ОТС 2-й категории. В иных случаях отказ ВИП может быть зафиксирован как ОТС 3-й категории.

Также существующие стандарты не предполагают наличия большого количества локомотивов в группе риска. Известны методы формирования рейтинга машинистов в рамках интеллектуальных систем [17], в то же время ранжирование локомотивов почти не применяется на практике.

В работе [18] было выполнено ранжирование выборок тепловозов серий ТЭ10 и ТЭ25К2М по одной из железных дорог РФ по двум показателям надёжности – точечной оценке параметра потока отказов и коэффициенту внутренней готовности, которые рассчитываются по формулам

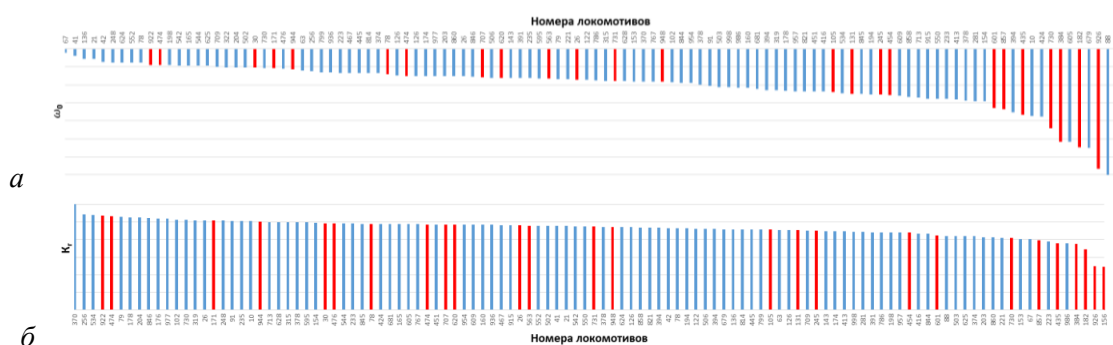
$$\hat{\omega}_0 = \frac{n}{X_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где  $\hat{\omega}_0$  – точечная оценка параметра потока отказов,  $1/10^6$  млн км;  
 $n$  – число ОТС на локомотив;  
 $X_{\Sigma}$  – линейный пробег рассматриваемого локомотива, млн км;

$$K_{вг} = \frac{T_{pc}}{T_{pc} + T_{om}}, \quad (2)$$

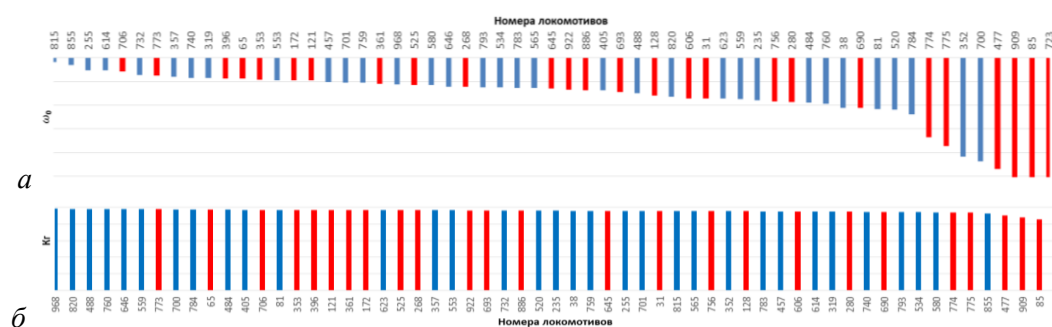
где  $K_{BG}$  – коэффициент готовности;  
 $T_{pc}$  – время пребывания локомотива в работоспособном состоянии, ч;  
 $T_{om}$  – время пребывания локомотива в неработоспособном состоянии, ч.

Результат ранжирования приведен на рис. 3 и 4. В обоих случаях ранжирование выполнено по снижению технического состояния (рост параметра потока отказов и снижение коэффициента готовности соответственно). Для удобства сопоставления порядковых позиций локомотивов ось ординат графика ранжирования по точечной оценке параметра потока отказов приведена по возрастанию сверху вниз. Номера локомотивов обеих серий зашифрованы. Показатели надёжности приведены в относительных единицах исключительно для сопоставления технического состояния отдельных локомотивов друг с другом. Красным цветом отмечены локомотивы, совпадающие по порядковой позиции по обоим показателям или сдвинутые не более чем на 8 позиций в большую или меньшую сторону. В случае с выборкой тепловозов серии ТЭ10 совпадение позиций по данному условию наблюдается для 44 % локомотивов, по серии ТЭ25К2М – для 23 %. Несовпадение позиций свидетельствует о разном характере показателей надёжности. При этом для обеих серий в крайней правой части двух групп графиков оказались 4 наименее надёжных локомотива [18].



**Рис. 3. Ранжирование локомотивов серии ТЭ25К2М:**

*а* – по точечной оценке параметра потока ОТС; *б* – по коэффициенту готовности



**Рис. 4. Ранжирование локомотивов серии ТЭ10:**

*а* – по точечной оценке параметра потока ОТС; *б* – по коэффициенту готовности

Также в указанной работе [18] произведено определение числа локомотивов в рассматриваемых выборках, которые попадают по критериям [4] в группу риска, а именно локомотивы, имеющие три и более ОТС 1-й и 2-й категорий после планового ТОиР или 5 unplanned repairs in the reporting period, equal to 90 days. На языке MS Visual Basic for Application была разработана программа для обработки табличного массива Excel с данными об отказах локомотивов выборки в соответствии с требованиями [4]. Результат обработки данных по ОТС показал, что в 2024 г. 83 % локомотивов серии ТЭ25К2М и 41 % локомотивов серии ТЭ10 выборок входили в группу риска.

Результаты расчёта количества тепловозов, попадающих в группу риска из выборки, показывают, что если такой значимый процент тепловозов попадает в группу риска, то велик риск того, что ко всем указанным тепловозам будет крайне затруднительно выполнить весь перечень контрольных и ремонтных мероприятий, предусмотренных [4], в дополнение к мероприятиям планового ТОиР. В то же время неравномерность технического состояния тепловозов на основе оценки показателей

надёжности на рис. 3 и 4 показывает, что возможно ранжировать парк локомотивов на большее число групп, нежели две группы «локомотивов группы риска» и «локомотивов вне группы риска».

Предложим три варианта разграничения технического состояния локомотивов.

Первым рассмотрим наивный байесовский классификатор групп риска локомотивов по техническому состоянию на основе их показателей надёжности. Байесовские классификаторы базируются на принципе соответствия объекта одному из классифицируемых состояний с определенной вероятностью при наличии ряда значимых признаков этого состояния. Порядок [4] выделяет в качестве более значимого критерия ОТС, нежели НР, так как для включения локомотива в группу риска требуется всего три ОТС 1, 2-й категорий, а НР требуется в количестве пяти. Однако ОТС могут быть самой различной природы; далеко не всегда ОТС по степени тяжести равнозначен НР. Необходимость отправки локомотива на НР всегда требует исключения локомотива из рабочего парка; пересылка локомотива на НР может занимать несколько суток, как и сам НР. В то же время ОТС далеко не всегда приводит к НР локомотива. После ОТС восстановительные работы по локомотиву часто могут быть выполнены в рамках планового ТОиР. Дискуссионным является вопрос о том, что является более тяжелым для перевозочного процесса – вывод локомотивов на НР и уменьшение числа доступных тяговых ресурсов на несколько дней в условиях дефицита парка локомотивов, или ОТС на 1–2 ч.

Поэтому предложим классификацию технических состояний локомотивов по нескольким категориям по риску, критерии отнесения к каждой из категорий, а также рекомендательные меры/предписания по ТОиР для каждой из этих групп на основе порядка [4] в табл. 8.

Таблица 8

**Наивный байесовский классификатор технических состояний локомотива по категориям риска и рекомендации/предписания по эксплуатации и ТОиР для каждой категории**

№	Категория риска	Критерий отнесения к категории риска	Рекомендации/предписания по эксплуатации	Рекомендации/предписания по ТОиР
1	Минимальный риск	Критерии прочих категорий риска отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствуют
2	Умеренный риск	ИЛИ $0 < \text{Количество ОТС 1, 2 категорий} < 3$ ИЛИ $0 < \text{Количество НР} < 3$ ИЛИ $0,99 < K_{BG} < 1$ ИЛИ $0 < \hat{\omega}_0 < 5$		Детализированная оценка тех. состояния по МПСУ и т.д.
3	Допустимый риск	ИЛИ три критерия отнесения к группе умеренного риска одновременно ИЛИ $3 \leq \text{Количество НР} < 5$ ИЛИ $3 \leq \text{Количество ОТС 1, 2 категорий} < 5$ ИЛИ $0,98 < K_{BG} < 0,99$	Ограничить постановку под поезда критической массы, в зависимости от результатов контроля после ТОиР	Комиссионная приёмка после ТОиР
4	Нежелательный риск	ИЛИ два критерия отнесения к группе допустимого риска ИЛИ $5 \leq \text{Количество НР} < 7$ ИЛИ $0,975 \leq K_{BG} < 0,98$ ИЛИ $5 \leq \text{Количество ОТС 1, 2 категорий}$	Не ставить с поездом критической массы на участки с максимальными на данной ж. д. руководящими подъемами	Направление уведомления в сервисную компанию для восстановления характеристик локомотива до ТУ
5	Недопустимый риск	ИЛИ два критерия отнесения к группе нежелательного риска ИЛИ $K_{BG} < 0,975$ ИЛИ $7 \leq \hat{\omega}_0$ ИЛИ $7 \leq \text{Количество НР}$	Не ставить под поезда критической массы	Комиссионное решение о внеочередном крупном ремонте (ТР-2, ТР-3, СР, КР)

Второй вариант разграничения технических состояний локомотивов – введение вектора отклонений параметров  $\Delta X$  локомотива от допустимых требованиями технических условий или документации на локомотив или уставок МПСУ.

В общем виде такой вектор  $\Delta X$  для режима  $m$  будет определяться формулой

$$\Delta X_m = (\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_t, \dots, \Delta X_n), \quad (3)$$

где  $\Delta X_1 \div \Delta X_n$  – отклонения параметров с 1-го по  $n$ -й.

При отсутствии отклонений при свертке вектора  $\Delta X_m$  результат свертки может быть принят равным 0.

Кроме вектора отклонений  $\Delta X_m$  введем также вектор режимов работы локомотива  $N_m$ , в каждом из которых предусмотрена верхняя и нижняя границы каждого параметра для данного режима  $m$ . Вектор режимов определяется по формуле  $N_m$

$$N_m = \begin{pmatrix} N_{m1 \max}, \dots, N_{mt \max}, \dots, N_{mn \max} \\ N_{m1 \min}, \dots, N_{mt \min}, \dots, N_{mn \min} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $N_{mt \max}$  – максимально допустимое значение параметра для режима  $m$ ;

$N_{mt \min}$  – минимально допустимое значение параметра для режима  $m$ .

В случае наличия отклонения  $\Delta X_t$  свыше установленного максимального значения  $N_{mt \max}$  или ниже установленного минимального значения  $N_{mt \min}$  при свертке вектора отклонений  $\Delta X_m$  в зависимости от числа отклонений результат свертки вектора может быть принят равным 1, 2, 3... (числу отклонений или другому) в зависимости от условий свёртки.

Тогда по общему вектору результатов свертки  $\Delta X$  возможно судить, в каких режимах и какое количество отклонений от нормальной работы наблюдается. Вектор результатов свертки будет равен

$$\Delta X' = (\Delta X'_1, \dots, \Delta X'_t, \dots, \Delta X'_n), \quad (5)$$

где  $\Delta X'_t$  – результат свертки вектора отклонений параметров  $\Delta X_t$ .

В зависимости от количества отклонений параметров локомотива от нормированных значений будет определяться ранжирование его технических состояний по образцу табл. 8.

Третий вариант разграничения технических состояний локомотивов – комбинирование наивного классификатора, основанного на показателях надёжности и оценки отклонений реальных параметров работы локомотива от номинальных значений, как во втором варианте выше. Такой вариант позволит учитывать как обобщенную оценку состояния локомотива (по показателям надёжности), так и точечные отклонения, вызванные износом или деградацией конкретных узлов или систем.

На рис. 5 приведен возможный алгоритм разграничения технических состояний локомотивов, комбинирующий описанные выше первый и второй варианты. После отнесения локомотива в одну из групп риска классификатором проверяются данные микропроцессорной системы управления (МПСУ) данного локомотива за несколько последних поездов. В зависимости от числа отклонений локомотив либо переводится в группу меньшего риска, либо остается в своей группе риска, либо переводится в более высокую группу риска на период времени  $T$ . После истечения «гарантийного» периода  $T$  локомотив возвращается в группу риска, заданную классификатором. Опционально может проводиться повторная оценка классификатором или оценка данных МПСУ.

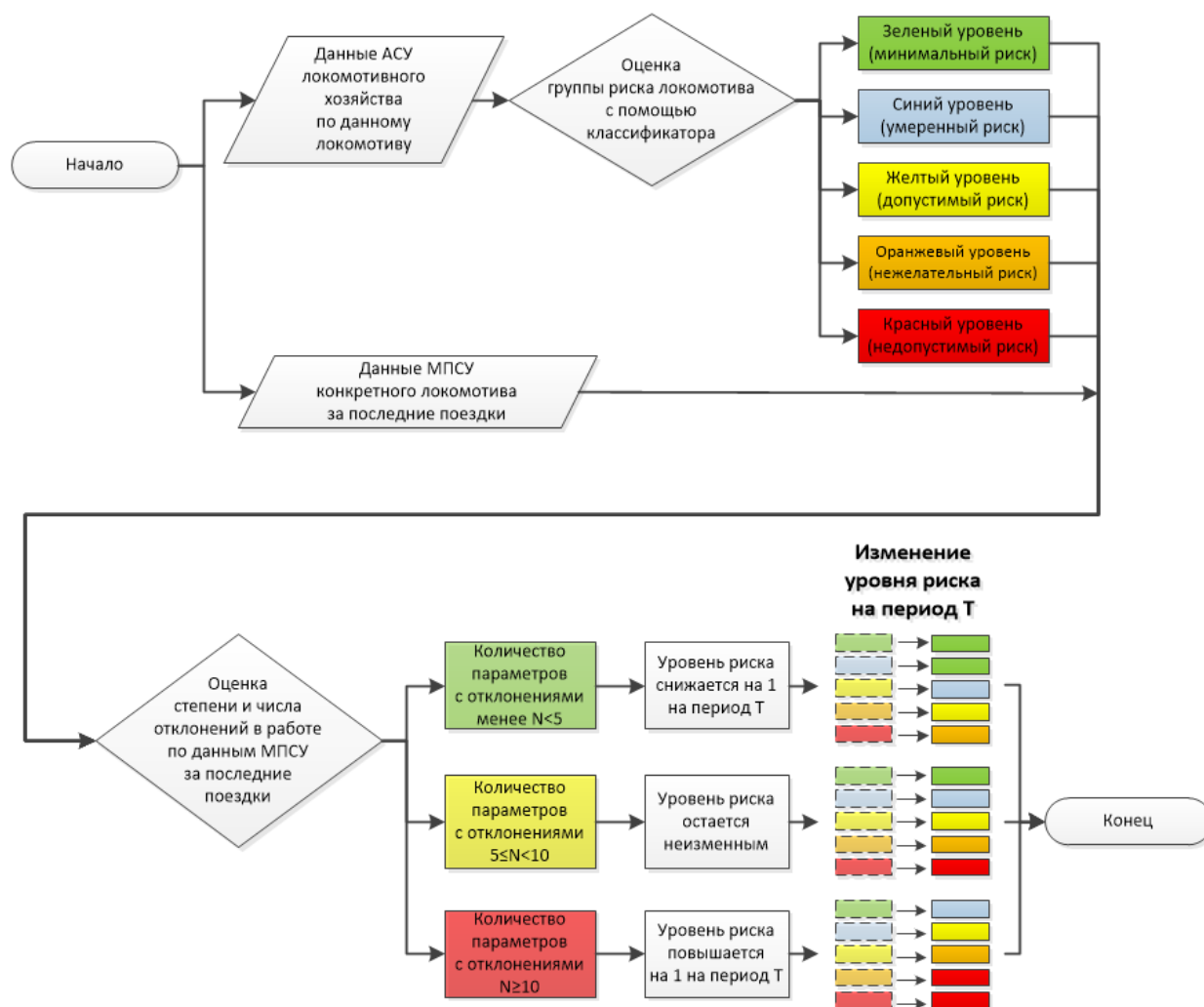


Рис. 5. Алгоритм разграничения технических состояний локомотива (комбинированный вариант)

### Выводы

В статье рассмотрены нормативно установленные виды технических состояний локомотивов, а также фактически используемые заводами-изготовителями способы разграничения в рамках процесса ТОиР. В связи с тем, что техническая диагностика базируется на теории распознавания образов, для сравнения приведены примеры разграничения состояний (образов) из нормативно-технической документации в сфере надёжности, технические состояния объектов ЖАТ и СЦБ, объектов энергетики, а также методики распределения работников локомотивного хозяйства по группам риска (по состояниям), которые являются куда более развернутыми по сравнению с методикой разграничения технических состояний локомотивов (8 категорий состояний машинистов против двух категорий состояний локомотивов).

Результаты ранжирования выборки тепловозов нескольких серий, а также оценка того, какое их количество попадет в группу риска показывают, что при существующей методике отнесения локомотивов в группу риска ремонтному комплексу будет затруднительно выполнить полный комплекс ТОиР, предусмотренный для группы риска в дополнение к плановому и неплановому ТОиР.

В качестве усовершенствования нормативно закрепленных видов технических состояний локомотивов (вне группы риска/в группе риска) предложено использовать наивный байесовский классификатор для отнесения локомотивов в несколько категорий риска по их техническим состояниям на основе показателей надёжности; для каждой категории риска предусмотрены свои рекомендации по эксплуатации и ТОиР. Также предложено два других варианта разнесения локомотивов по техническим состояниям (на основе оценки отклонений рабочих параметров локомотива от норматива и комбинированный вариант).

## Список литературы

- 1 ГОСТ Р 27.102-2021. Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения. – Москва : РИС, 2021. – 40 с.
- 2 Ефанов, Д. В. Микропроцессорная система диспетчерского контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: учебное пособие для вузов / Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 180 с. – ISBN 978-5-507-46132-5, 978-5-8114-8991-6.
- 3 Инструкция по учёту локомотивов, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 29 октября 2012 года N 2155 р // Консорциум Кодекс : электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456001763> (дата обращения: 25.02.2026).
- 4 Порядок работы с локомотивами группы риска (утверждён распоряжением ОАО «РЖД» от 20.12.2022 г. N 3383/р) // КонсультантПлюс : правовой сайт. – URL: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения: 25.02.2026).
- 5 МПСUiD. Программное обеспечение блока монитор. Руководство оператора. Лист утверждения RU.ЦСРТ.426465.001-01 34 03-ЛУ. – Москва : ООО «Центр инновационного развития СТМ», 2022. – 25 с.
- 6 Брексон, В. В. Электровоз 2ЭС6 «Синара» : монография / В. В. Брексон, Н. Б. Никифорова, А. А. Струннов ; под ред. В. В. Брексона. – Верхняя Пышма : Уральские локомотивы, 2015. – 328 с. – ISBN 978-5-89277-120-7.
- 7 «Микропроцессорная система управления и диагностики электровоза 2ЭС6 «Синара» // 3DFAB : электронный образовательный ресурс. – URL: [https://www.3dfab.ru/portfolio/tutorial-2es6\\_mpsuid/](https://www.3dfab.ru/portfolio/tutorial-2es6_mpsuid/) (дата обращения: 14.01.2026).
- 8 Контеев, В. Д. Развитие удаленной диагностики и мониторинга технического состояния новых серий локомотивов / В. Д. Контеев, Д. Л. Худояров, О. И. Ветлугина // Железнодорожный транспорт и технологии : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 29–30 ноября 2023 года. – Екатеринбург : Уральский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 53–56. – EDN XRYOIP.
- 9 Науменко, А. П. Введение в техническую диагностику и неразрушающий контроль : учебное пособие / А. П. Науменко. – Омск : ОмГТУ, 2019. – 152 с. – ISBN 978-5-8149-2812-2.
- 10 Воронкова, И. Н. Возможности применения АСПТ и автоматизированного ранжирования локомотивных бригад / И. Н. Воронкова, А. В. Новикова // Локомотив. – № 2. – 2021. – С. 8–10. – ISSN 0869-8147.

## References

- 1 GOST R 27.102–2021. Reliability in engineering. Facility reliability. Terms and definitions. – Moscow : RIS, 2021. – 40 p.
- 2 Efanov, D. V. Microprocessor-based system for dispatching control of railway automation and telemechanics devices : a textbook for universities / D. V. Efanov, G. V. Osadchiy. – 2nd ed., reprinted. – Saint Petersburg : Lan, 2022. – 180 p. – ISBN 978-5-507-46132-5, 978-5-8114-8991-6.
- 3 Instruction on locomotive accounting, approved by Order of JSC “Russian Railways” dated October 29, 2012, No. 2155 r // Consortium Code : an electronic collection of legal and regulatory documents. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456001763> (date of access: 25.02.2026).
- 4 Procedure for working with locomotives of the risk group, approved by Order of JSC “Russian Railways” dated December 20, 2022, No. 3383/r // ConsultantPlus : legal website. – URL: <https://www.consultant.ru/> (date of access: 25.02.2026).
- 5 MPSUiD (Microprocessor control and diagnostic system). Monitoring unit software. Operator’s manual. Approval sheet RU.TsSRT.426465.001-01 34 03-LU. – Moscow : LLC “Center for Innovative Development STM”, 2022. – 25 p.
- 6 Brekson, V. V. Electric locomotive 2ES6 “Sinara” : monograph / V. V. Brekson, N. B. Nikiforova, A. A. Strunnov ; edited by V. V. Brekson. – Verkhnyaya Pyshma : Ural Locomotives, 2015. – 328 p. – ISBN 978-5-89277-120-7.
- 7 Microprocessor control and diagnostics system for the 2ES6 Sinara electric locomotive // 3DFAB : an electronic educational resource. – URL: [https://www.3dfab.ru/portfolio/tutorial-2es6\\_mpsuid/](https://www.3dfab.ru/portfolio/tutorial-2es6_mpsuid/) (date of access: 14.01.2026).
- 8 Konteev, V. D. Development of remote diagnostics and monitoring of the technical condition of new locomotive series / V. D. Konteev, D. L. Khudoyarov, O. I. Vetlugina // Railway transport and technologies : proceedings of the International scientific and practical conference, Yekaterinburg, November 29–30, 2023. Ural State Transport University. – Yekaterinburg, 2024. – P. 53–56. – EDN XRYOIP.
- 9 Naumenko, A. P. Introduction to technical diagnostics and non-destructive testing : a textbook / A. P. Naumenko. – Omsk : Omsk State Technical University, 2019. – 152 p. – ISBN 978-5-8149-2812-2.
- 10 Voronkova, I. N. Possibilities of applying ASPT and automated ranking of locomotive crews / I. N. Voronkova, A. V. Novikova // Lokomotiv. – No. 2. – P. 8–10. – ISSN 0869-8147.

11 Положение о машинисте-инструкторе локомотивных бригад Дирекции тяги, утверждённое распоряжением ОАО «РЖД» от 9 апреля 2018 г. № 707/р // КонсультантПлюс : правовой сайт. – URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=668103#y0nH7FV0ictfeLT21> (дата обращения: 01.02.2026).

12 Методика формирования групп риска работников локомотивных бригад по медицинским и психофизиологическим показателям : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 1 декабря 2011 г. N 330 // КонсультантПлюс : правовой сайт. – URL: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения: 25.02.2026).

13 Методические рекомендации по оценке психологической совместимости работников локомотивных бригад ОАО «РЖД», утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 6 октября 2025 г. № 2102р // КонсультантПлюс : правовой сайт. – URL: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения: 25.01.2026).

14 Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей : утверждена приказом Минэнерго РФ от 26 июля 2017 г. № 676 // Консорциум Кодекс : электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456088008> (дата обращения: 15.02.2026).

15 **Горохов, В. Г.** Методологический анализ системотехники : монография / В. Г. Горохов. – Москва : Радио и связь, 1982. – 160 с.

16 **Лакин, И. К.** Расчет вероятности категорий отказов по надежности оборудования локомотивов / И. К. Лакин, А. П. Семенов // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 2–8. – ISSN 2220-4245.

17 **Кулагин, М. А.** Методы формирования рейтинга машинистов в рамках интеллектуальной системы / М. А. Кулагин, В. Г. Сидоренко, О. В. Харин // Интеллектуальные транспортные системы : материалы II Международной научно-практической конференции, Москва, 25 мая 2023 года. – Москва : Российский университет транспорта, 2023. – С. 205–211. – DOI 10.30932/9785002182794-2023-205-211.

18 **Потапов, А. А.** Применение методов ранжирования по техническому состоянию парка локомотивов в пределах серии / А. А. Потапов // Повышение эксплуатационной надежности локомотивного парка, комплексная диагностика и мониторинг : материалы Всероссийского научно-образовательного форума «ТРАНССИБУЗ-2025» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2025. – С. 59–65.

11 Regulations on the locomotive driver-instructor of the Traction Directorate's locomotive crews, approved by Order of JSC “Russian Railways” dated April 9, 2018, No. 707/r // ConsultantPlus : legal website. – URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=668103#y0nH7FV0ictfeLT21> (date of access: 01.02.2026).

12 Methodology for forming risk groups of locomotive crew employees based on medical and psychophysiological indicators : approved by Order of JSC “Russian Railways” dated December 1, 2011, No. 330 // ConsultantPlus : legal website. – URL: <https://www.consultant.ru/> (date of access: 25.02.2026).

13 Methodological recommendations for assessing psychological compatibility of locomotive crew employees of JSC “Russian Railways”, approved by Order of JSC “Russian Railways” dated October 6, 2025, No. 2102r // ConsultantPlus : legal website. – URL: <https://www.consultant.ru/> (date of access: 25.01.2026).

14 Methodology for assessing the technical condition of main technological equipment and power transmission lines of power plants and electric networks : approved by Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated July 26, 2017, No. 676 // Consortium Code : electronic collection of legal and regulatory documents. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456088008> (date of access: 15.02.2026).

15 **Gorokhov, V. G.** Methodological analysis of systems engineering : monograph. – Moscow : Radio i svyaz, 1982. – 160 p.

16 **Lakin, I. K.** Calculation of the probability of failure categories based on the reliability of locomotive equipment / I. K. Lakin, A. P. Semenov // Izvestiya Transsiba. – 2020. – No. 4 (44). – P. 2–8. – ISSN 2220-4245.

17 **Kulagin, M. A.** Methods for forming a driver rating within an intelligent system / M. A. Kulagin, V. G. Sidorenko, O.V. Kharin // Intelligent transport systems : proceedings of the II International scientific and practical conference, Moscow, May 25, 2023. Moscow : Russian University of Transport, 2023. – P. 205–211. – DOI 10.30932/9785002182794-2023-205-211.

18 **Potapov, A. A.** Application of ranking methods based on the technical condition of a locomotive fleet within a series / A. A. Potapov // Improving the operational reliability of the locomotive fleet, integrated diagnostics and monitoring : proceedings of the All-Russian scientific and educational forum “TRANSSIBUZ-2025” / Omsk State Transport University. – Omsk, 2025. – P. 59–65.

*A. K. Plyaskin, A. A. Potapov*

## METHODS FOR DIFFERENTIATING TECHNICAL CONDITIONS OF LOCOMOTIVES

**Abstract.** The problem of differentiating between the technical conditions (TC) of locomotives is examined. The differentiating and identification of technical states constitute one of the primary tools of technical diagnostics, based on the theory of pattern recognition. Examples of technical conditions classification (patterns) drawn from the regulatory and technical framework in the field of reliability are presented, alongside the examples of technical conditions for railway signals and interlocking devices, an example of TC from the energy sector, and types of risk groups (conditions) of locomotive crew members are provided. The presented comparison reveals that more detailed methods for distinguishing TC exist for individual locomotive components and assemblies than for the entire locomotive, despite its complexity and the principle of superadditivity (a system is more complex than the sum of its parts).

The effectiveness of the current methodology for classifying locomotives into risk groups is evaluated. Using the existing methods of distribution, due to the large number of high-risk locomotives, the repair complex will not be able to perform the specified amount of work due to the availability of maintenance plans and unplanned repairs.

In order to improve the operation of locomotives, several new methods for classifying their operational characteristics are proposed: using a naive Bayesian classifier based on reliability indicators, assessing the deviation of locomotive operating (working) parameters from the standard, and a combined method.

**Keywords:** management of the locomotive fleet, technical condition, risk condition, Bayesian classifier, criterion.

**For citation:** Plyaskin, A. K. Methods for differentiating technical conditions of locomotives / A. K. Plyaskin, A. A. Potapov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 121–134. – DOI 10.46973/0201–727X\_2026\_1\_121.

### Сведения об авторах

**Пляскин Артем Константинович**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), проректор по учебной работе, кандидат технических наук, доцент, e-mail: prur@festu.khv.ru

**Потапов Антон Андреевич**

Хабаровская группа заказчика по строительству объектов железнодорожного транспорта – обособленное подразделение Дирекции по комплексной реконструкции железных дорог и строительству объектов железнодорожного транспорта – филиал ОАО «РЖД», ведущий инженер, e-mail: thenorthkambox@mail.ru

### Information about the authors

**Plyaskin Artem Konstantinovich**

Far Eastern State Transport University (FESTU), Vice-rector for academic work, Candidate of Engineering Science, Associate Professor e-mail: prur@festu.khv.ru

**Potapov Anton Andreevich**

The Khabarovsk customer group for the construction of railway facilities – a separate division of the Directorate for the Comprehensive Reconstruction of Railways and the Construction of Railway Facilities – a branch of JSC “Russian Railways”, Lead Engineer, e-mail: thenorthkambox@mail.ru

*В. С. Томилов, Т. В. Волчек*

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ЗА СЧЕТ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОВЫМ СООТНОШЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИХ СИЛ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ

**Аннотация.** Статья посвящена повышению энергетической эффективности и надежности коллекторных тяговых электродвигателей электровозов переменного тока путем применения адаптивного управления резистором постоянной шунтировки обмотки возбуждения. Показано, что пульсации выпрямленного напряжения в цепи возбуждения приводят к возникновению трансформаторной ЭДС, которая при фиксированном значении сопротивления шунта обеспечивает благоприятное фазовое соотношение ЭДС лишь в узкой области режимов вблизи номинального тока якоря. При отклонении от номинального режима условия коммутации нарушаются, возникает интенсивное искрение и увеличиваются потери в щеточных контактах.

Предложено решение, основанное на использовании управляемого электронного ключа в цепи резистора шунтировки, позволяющее адаптировать эквивалентное сопротивление шунтирующей ветви в зависимости от тока якоря. Расчетные оценки показывают, что при внедрении адаптивного управления потери в щеточном узле снижаются на 25–35 %, а общие потери в тяговом электродвигателе – на 4 %.

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, тяговый электрический двигатель, коммутационная устойчивость, управляемый электронный ключ, искрение, круговой огонь.

**Для цитирования:** Томилов, В. С. Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока за счет адаптивного управления фазовым соотношением электродвижущих сил в тяговом электродвигателе / В. С. Томилов, Т. В. Волчек // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 135–142. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_135.

### **Введение**

Железнодорожный транспорт остается одним из ключевых потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в транспортном комплексе. На его долю приходится около 1 % мирового энергопотребления и свыше 2 % энергии, расходуемой транспортным сектором. При этом в структуре затрат ОАО «РЖД» значительную часть занимают именно ТЭР на тягу поездов: по различным оценкам, до 80 % совокупного потребления ТЭР железными дорогами связано с обеспечением тяги. В условиях роста цен на энергоресурсы и жестких экологических требований вопросы повышения энергетической эффективности тяги поездов приобретают первостепенное значение [1].

Существенный вклад в энергопотребление железных дорог России вносят электровозы переменного тока с коллекторными тяговыми электродвигателями, оснащенные выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП). Несмотря на широкое внедрение рекуперативного торможения и современных схем управления, значительная часть эксплуатируемого парка электровозов переменного тока не соответствует актуальным требованиям по энергетическим показателям, регламентируемым действующими стандартами. Это проявляется в повышенном удельном расходе электроэнергии на тягу поездов и необходимости поиска внутренних резервов энергосбережения на уровне силового оборудования электровоза [2].

Одним из ключевых элементов, определяющих энергетические показатели электровоза, является тяговый электродвигатель (ТЭД). Для электровозов переменного тока, оборудованных коллекторными ТЭД пульсирующего тока, характерен сложный состав потерь мощности, включающий электрические, магнитные, механические и добавочные составляющие. Особое место среди них занимают потери в щеточных контактах, обусловленные как падением напряжения на контакте «щетка – коллектор», так и дополнительными потерями при искрении.

Практика эксплуатации показывает, что скользящий контакт «щетка – коллектор» является одним из наиболее уязвимых узлов коллекторных тяговых двигателей. Более 50 % отказов силового оборудования электровозов приходится на ТЭД, при этом свыше 40 % обусловлены именно перебросом

электрической дуги и возникновением искрения [3]. Это отражается не только на надежности и ремонтпригодности, но и на энергетической эффективности, поскольку ухудшение состояния контакта сопровождается ростом потерь мощности и снижением КПД тягового привода. Важнейшим следствием развития интенсивного искрения в этом узле является переход к режиму кругового огня по коллектору, сопровождающийся локальным перегревом, подгаром пластин и разрушением контактной поверхности. На рис. 1 приведен пример последствий воздействия кругового огня на коллекторно-щеточный узел тягового электродвигателя.



**Рис. 1. Последствия действия кругового огня по коллектору тягового электродвигателя**

Таким образом, искрение в контакте «щетка – коллектор» необходимо рассматривать не только как источник дополнительных электрических потерь и снижения энергетической эффективности, но и как фактор, непосредственно ограничивающий надежность и ресурс тяговых электродвигателей.

В научной литературе накоплен значительный опыт по повышению энергоэффективности электровозов переменного тока за счет совершенствования силовых преобразователей, режимов рекуперативного торможения, систем компенсации реактивной мощности и модернизации многодвигательных тяговых приводов. В то же время вопросы количественной оценки вклада потерь в щеточном узле коллекторных ТЭД в общий баланс потерь электровоза и влияние искрения на энергетическую эффективность освещены недостаточно полно [4, 5].

В связи с этим актуальной представляется задача анализа структуры потерь в тяговом электродвигателе электровоза переменного тока с выделением потерь в щеточных контактах, а также уточнения влияния искрения на величину этих потерь и, как следствие, на энергетическую эффективность локомотива.

#### ***Потери мощности в тяговом электродвигателе электровоза переменного тока***

Энергетическую эффективность тягового электродвигателя целесообразно характеризовать коэффициентом полезного действия, определяемым отношением полезной механической мощности на валу к подведенной электрической мощности

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}, \quad (1)$$

где  $P_1$  – подведенная к двигателю электрическая мощность, Вт;  $\Delta P$  – суммарные потери мощности в электродвигателе, Вт.

Суммарные потери мощности  $\Delta P$  представляют собой сумму ряда составляющих

$$\Delta P = \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}, \quad (2)$$

где  $\Delta P_{\text{эл}}$  – электрические потери в меди обмоток якоря и возбуждения, Вт;  $\Delta P_{\text{щ}}$  – потери в щеточных контактах, Вт;  $\Delta P_{\text{маг}}$  – магнитные потери в стали магнитопровода, Вт;  $\Delta P_{\text{мех}}$  – механические потери (на трение и вентиляцию), Вт;  $\Delta P_{\text{доб}}$  – добавочные (дополнительные) потери, Вт.

Такое разложение позволяет перейти от интегральной оценки КПД двигателя к анализу отдельных механизмов потерь и выявлению наиболее существенных составляющих в эксплуатационных режимах электровоза переменного тока.

Для магистральных грузовых электровозов, эксплуатируемых на сети ОАО «РЖД», характерны высокие значения токов якоря и сложные режимы работы тяговых двигателей, что приводит к значительной доле переменных по нагрузке потерь, зависящих от тока и частоты коммутации.

Электрические потери  $\Delta P_{эл}$  традиционно рассматриваются как основная нагрузочная составляющая потеря, поскольку они прямо пропорциональны квадрату тока якоря и определяются сопротивлениями обмоток. На ТЭД электровозов переменного тока, питаемых от выпрямительно-инверторных преобразователей, дополнительное влияние оказывают высшие гармоники тока, приводящие к росту эквивалентных потерь в меди и стали.

Магнитные потери  $\Delta P_{маг}$  зависят главным образом от конструкции магнитопровода и уровня магнитной индукции в зубцовой и спинковой зонах. В условиях пульсирующего питания они могут возрастать за счет увеличения удельных потерь на перемагничивание и вихревые токи в стали.

Механические потери  $\Delta P_{мех}$  связаны с трением в подшипниковых опорах, трением щеток о коллектор, а также с вентиляционными потерями. Часть механических потерь непосредственно связана с работой коллекторно-щеточного узла (КЩУ), но в энергетическом балансе их обычно отделяют от чисто электрических потерь в контакте.

Добавочные потери  $\Delta P_{доб}$  включают в себя коммутационные потери в меди обмотки якоря от действия главного и реактивного пазовых полей, а также увеличение потерь в стали от искажения магнитного поля машины при нагрузке. В обобщенном виде их можно представить в виде зависимости от тока якоря

$$\Delta P_{доб} = \alpha \times I_{я}^2 + \beta \times (I_{я} - I_{кр})^2 \times S_{искр}, \quad (3)$$

где  $I_{я}$  – ток якоря, А;  $\alpha, \beta$  – эмпирические коэффициенты;  $I_{кр}$  – характерный ток (ток критического режима коммутации), А;  $S_{искр}$  – показатель, связанный с интенсивностью искрения.

Из данного выражения видно, что часть добавочных потерь тесно связана с качеством коммутации и наличием искрения под щетками, что создает методологическую связь между добавочными потерями и потерями в щеточных контактах.

В классическом подходе потери в щеточных контактах  $\Delta P_{щ}$  относятся к электрическим потерям, поскольку обусловлены падением напряжения на контакте при протекании тока якоря. Однако для тяговых электродвигателей электровозов переменного тока, работающих при больших токах и в тяжелых коммутационных условиях, вклад этих потерь в общий баланс мощности может быть существенно недооценен.

Во-первых, щеточный контакт работает в условиях одновременного действия механических и электрических факторов – давление щетки, скорость скольжения, состояние поверхности коллектора, наличие политуры, воздействие вибраций и температурных градиентов. Во-вторых, при развитии искрения под щетками происходит резкий рост эквивалентного сопротивления контакта и, как следствие, увеличение падения напряжения и потерь мощности.

Таким образом, для корректной оценки энергетической эффективности тягового привода электровоза переменного тока представляется целесообразным рассматривать  $\Delta P_{щ}$  как отдельную составляющую, функционально связанную с надежностью и состоянием коллекторно-щеточного узла.

#### ***Потери мощности в тяговом электродвигателе электровоза переменного тока***

Потери мощности в щеточных контактах в установившемся режиме тяги определяются как

$$\Delta P_{щ} = I_{я} \times \Delta U_{щ,искр}, \quad (4)$$

где  $I_{я}$  – ток якоря, А;  $\Delta U_{щ,искр}$  – падение напряжения на щетке с учетом возможного искрения, В.

В отсутствие заметного искрения падение напряжения на щетке  $\Delta U_{щ}$  для тяговых электродвигателей с угольными щетками составляет, как правило, порядка 1,5–2,5 В, что соответствует требованиям ГОСТ 2582–2013 на испытания ТЭД. При этом потери в щеточном контакте относятся к электрическим потерям и вносят вклад, пропорциональный току якоря.

С точки зрения энергетического баланса электровоза даже относительно небольшое падение напряжения на щетках приводит к заметным суммарным потерям, учитывая высокие значения токов якоря и большое количество ТЭД в составе локомотива. Поэтому стабилизация и снижение  $\Delta U_{щ}$  за

счет оптимизации конструкции щеток и условий работы КЩУ является одним из значимых, хотя и локальных резервов повышения энергоэффективности.

При нарушении нормальных условий работы КЩУ возникает местное искрение под щетками и/или по поверхности коллектора. Скользящий контакт становится нестабильным, фактическая площадь токопроводящего контакта уменьшается, а часть тока протекает через дуговой разряд в воздушном промежутке.

С энергетической точки зрения это эквивалентно росту эквивалентного сопротивления контакта и дополнительному падению напряжения, связанному с наличием дугового разряда. В упрощенной форме влияние искрения на падение напряжения на щетках можно описать линейной зависимостью

$$\Delta U_{\text{щ.искр}} = \Delta U_{\text{щ}} + k_{\text{искр}} \times I_{\text{я}}, \quad (5)$$

где  $\Delta U_{\text{щ}}$  – номинальное падение напряжения на щетке без искрения (обычно 1,5–2,5 В), В;  $k_{\text{искр}}$  – эмпирический коэффициент, учитывающий рост потерь из-за искрения (порядка 0,001–0,005 В/А), В/А.

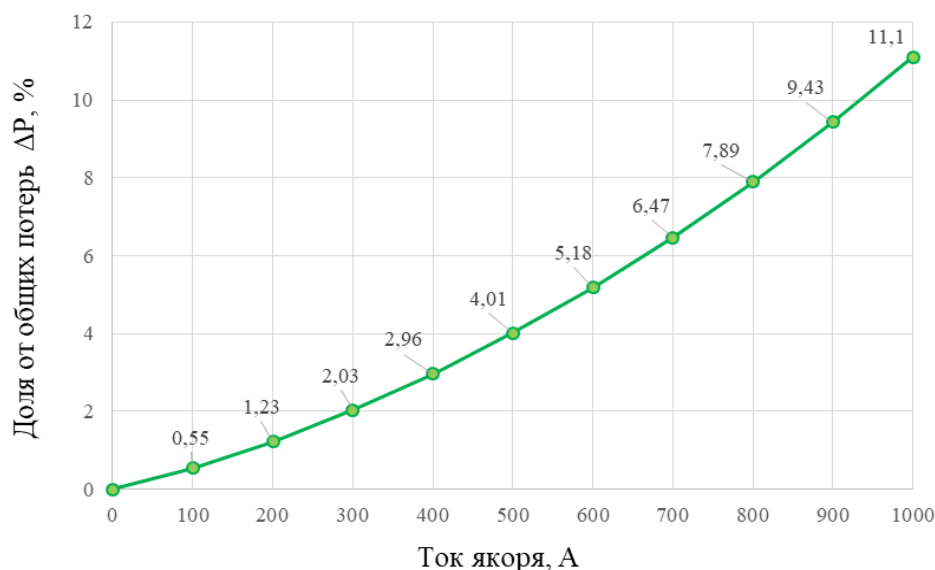
Коэффициент  $k_{\text{искр}}$  отражает вклад дополнительного сопротивления дуги и нарушения сплошности контакта. Его значение зависит от типа ТЭД, конструкции и материала щеток, состояния коллектора и режима работы. По оценкам, полученным для тяговых двигателей с номинальным током порядка  $I_{\text{я}} = 870$  А и падением напряжения на щетке  $\Delta U_{\text{щ}} \approx 2$  В, увеличение падения напряжения при развитии искрения может составлять 10–50 % от номинального, т. е. порядка 0,2–1 В. Отсюда для  $k_{\text{искр}}$  получается интервал порядка 0,00023–0,00115 В/А, который с учетом возможных пиковых токов и более интенсивного искрения расширяют до диапазона 0,001–0,005 В/А.

Подстановка выражения для  $\Delta U_{\text{щ.искр}}$  в формулу потерь в щеточном контакте дает

$$\Delta P_{\text{щ}} = I_{\text{я}} \times \Delta U_{\text{щ}} + k_{\text{искр}} \times I_{\text{я}}^2. \quad (6)$$

Таким образом, помимо линейной по току составляющей (номинальные потери в щеточном контакте), при искрении возникает квадратичная по току составляющая потеря, аналогичная по зависимости от тока джоулевым потерям в меди обмоток. Это принципиально важный момент с точки зрения тяжелых режимов работы ТЭД: при больших токах якоря дополнительная компонента  $k_{\text{искр}} \times I_{\text{я}}^2$  может стать сопоставимой по величине с отдельными видами электрических и добавочных потерь.

Для количественной оценки вклада потерь в щеточных контактах в общий баланс потерь тягового электродвигателя был проведен расчет по формулам (1)–(4). Суммарные потери мощности составили  $\Delta P \approx 40,45$  кВт. Результаты расчета потерь в щетках  $\Delta P_{\text{щ}}$  и их доли в общих потерях двигателя представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** Доля потери в щетках  $\Delta P_{\text{щ}}$  от общих потерь в ТЭД в зависимости от тока якоря

Анализ полученных данных показывает, что при переходе от средних величин тока якоря к номинальным и более нагруженным режимам потери в щеточных контактах возрастают нелинейно и при  $I_{\text{я}} = 900$  А превышают 9 % от суммарных потерь двигателя. При токах якоря 1000 А, характерных

для пусковых и более нагруженных режимов при вождении тяжеловесных поездов, доля щеточных потерь достигает 11,1 %, что значительно превышает типичный диапазон 3–8 %, указанный в технической литературе для коллекторных электрических машин. Такой рост обусловлен квадратичной по току составляющей потерь  $k_{\text{искр}} \times I_{\text{я}}^2$ , которая даже при средних паспортных значениях становится сопоставимой по величине с отдельными видами электрических и добавочных потерь.

#### ***Влияние пульсаций магнитного потока на возникновение искрения на коллекторе***

Одним из ключевых факторов, вызывающих искрение, является потеря коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей [5]. Наиболее актуальна данная проблема для коллекторных двигателей пульсирующего тока, питаемых выпрямленным напряжением. Наличие пульсации выпрямленного напряжения и тока в силовой цепи электровоза приводит к периодическим изменениям тока якоря и напряжения на выводах ТЭД.

Для снижения пульсации тока на электроподвижном составе традиционно применяют сглаживающий реактор. Однако жесткие массогабаритные и конструктивные ограничения не позволяют полностью подавить переменную составляющую тока, в результате чего коэффициент пульсации тока якоря  $\Delta I_{\text{я}}$  в реальных условиях эксплуатации достигает 25–30 % [6]. Пульсации тока в цепи возбуждения, в свою очередь, вызывают периодическое изменение магнитного потока тягового электродвигателя и индуцируют в обмотках тягового двигателя трансформаторную электродвижущую силу (ЭДС), которая определяется выражением

$$e_{\text{т}} = -\omega_{\text{с}} \times \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7)$$

где  $\omega_{\text{с}}$  – число витков обмотки главных полюсов тягового электродвигателя;  $\Phi$  – магнитный поток;  $t$  – время, с.

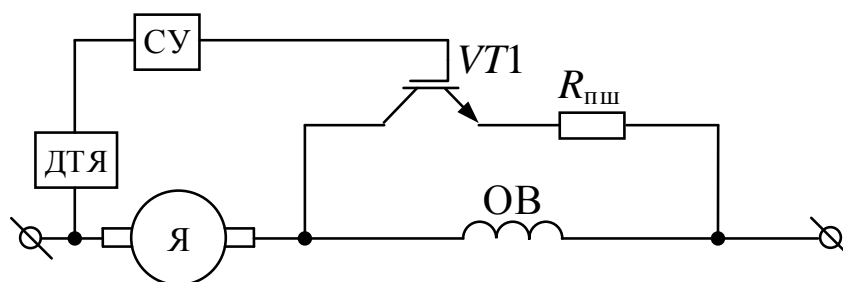
Рассматривая векторную диаграмму переменных составляющих магнитодвижущей и электродвижущей силы в тяговом электродвигателе, можно сделать вывод о том, что трансформаторная ЭДС, с одной стороны, может способствовать уменьшению дисбаланса между реактивной и коммутирующей ЭДС за счет удачно подобранной фазы и величины трансформаторной ЭДС. С другой стороны, при резких изменениях тока якоря, характерных для пуска и переходных процессов, вследствие того, что в это время производная магнитного потока по времени достигает значительных величин, сформируется наивысшее значение трансформаторной ЭДС большой амплитуды и, если в это время ее фаза окажется неблагоприятной по отношению к реактивной и коммутирующей ЭДС, возникнет искрение под щетками ТЭД [7].

Помимо сглаживающего реактора для снижения пульсаций тока в цепи возбуждения тягового электродвигателя также используется резистор постоянной шунтировки. Снижение пульсаций тока возбуждения достигается за счет того, что активное сопротивление шунтирующего резистора значительно меньше сопротивления обмотки возбуждения и основная переменная составляющая тока отводится в цепь резистора постоянной шунтировки [8–10].

Применяемый на электровозах переменного тока резистор постоянной шунтировки обмотки возбуждения подбирается, как правило, исходя из условий обеспечения удовлетворительной коммутации вблизи номинального режима работы тягового электродвигателя. При этом величина постоянного сопротивления  $R_{\text{шш}}$  обеспечивает приемлемое фазовое соотношение трансформаторной ЭДС с реактивной и коммутирующей ЭДС в зоне номинального тока якоря. Однако при существенном отклонении тока от номинального – в режимах трогания с места и разгона, либо при движении на высоких скоростях изменяются углы между векторами ЭДС на векторной диаграмме [8–10]. Это приводит к нарушению оптимальных условий коммутации, росту интенсивности искрения на коллекторе и увеличению вероятности перехода к режиму кругового огня. Таким образом, фиксированное значение сопротивления резистора постоянной шунтировки обеспечивает требуемый эффект компенсации трансформаторной ЭДС лишь в относительно узкой области режимов и не позволяет поддерживать удовлетворительные коммутационные условия во всем эксплуатационном диапазоне токов якоря.

#### ***Предлагаемый способ адаптивной компенсации трансформаторной ЭДС***

В целях расширения диапазона режимов, в которых достигается эффективная компенсация влияния трансформаторной ЭДС на процесс коммутации, в работе предлагается использовать управляемый электронный ключ в цепи резистора постоянной шунтировки. Схемотехнически такое решение реализуется за счет введения в шунтирующую цепь полупроводникового элемента, позволяющего изменять эквивалентное сопротивление шунта в функции тока якоря (рис. 3).



**Рис. 3. Упрощенная электрическая принципиальная схема адаптивного электронного ключа в цепи резистора постоянной шунтировки обмотки возбуждения**

При этом при токе, близком к номинальному, эквивалентное сопротивление шунтирующей цепи выбирается таким, чтобы обеспечить оптимальное фазовое соотношение трансформаторной, реактивной и коммутирующей ЭДС, а при отклонении тока якоря в сторону больших или меньших значений производится корректировка сопротивления шунта, направленная на сохранение удовлетворительных условий коммутации.

Предлагаемое решение позволяет «подстраивать» долю переменной составляющей тока, ответвляющейся в шунтирующую цепь, в зависимости от фактического режима работы тягового электродвигателя. При повышенных токах якоря снижение эквивалентного сопротивления шунтирующей цепи обеспечивает более глубокое шунтирование переменной составляющей тока возбуждения и уменьшение амплитуды трансформаторной ЭДС. В режиме движения с малыми токами, напротив, увеличение эквивалентного сопротивления позволяет избежать избыточного шунтирования и сохранять достаточную жесткость магнитной системы. В результате достигается выравнивание фазовых соотношений между трансформаторной, реактивной и коммутирующей ЭДС в широком диапазоне токов якоря, что приводит к снижению интенсивности искрения под щетками, уменьшению вероятности возникновения кругового огня по коллектору и, как следствие, к повышению надежности и энергетической эффективности тяговых электродвигателей.

Проведенный расчет для тягового электродвигателя мощностью 765 кВт показал, что при номинальном токе якоря и повышенных токах, характерных для участков с затяжными подъемами, доля потерь в щеточном узле в штатной схеме составляет 8–10 % от суммарных потерь двигателя (см. рис. 2). Таким образом, щеточные потери в нагруженных режимах становятся сопоставимыми по величине с отдельными составляющими добавочных потерь и оказывают измеримое влияние на общий КПД двигателя. Причина такого роста кроется в нелинейной зависимости потерь в щеточных контактах от тока якоря, при развитии искрения под щетками появляется квадратичная по току составляющая потеря, которая при токах выше номинального дает вклад в потери в щеточном узле примерно в 1,5–2 раза больший, чем в номинальном режиме. Применение адаптивного управления эквивалентным сопротивлением шунтирующей цепи позволяет снизить эту долю до 5–6 %, что соответствует уменьшению потерь в щеточном узле на 25–35 %. Общее снижение потерь в тяговом электродвигателе составляет примерно 4 %, включая сокращение добавочных коммутационных потерь, что эквивалентно приросту КПД около 1 % в нагруженных режимах.

### **Заключение**

1 Анализ показал, что потери в щеточных контактах коллекторных ТЭД при токах якоря 800–900 А достигают 8–10 % от суммарных потерь двигателя, что значительно влияет на энергетическую эффективность электровозов переменного тока.

2 Трансформаторная ЭДС, возникающая из-за пульсаций магнитного потока в цепи возбуждения, при фиксированном сопротивлении резистора постоянной шунтировки обеспечивает оптимальное фазовое соотношение лишь вблизи номинального режима. При отклонении от номинала коммутация нарушается и риск возникновения искрения возрастает.

3 Применение управляемого электронного ключа в цепи резистора постоянной шунтировки позволяет адаптивно изменять сопротивление шунта в зависимости от тока якоря, поддерживая благоприятные условия коммутации во всем диапазоне режимов.

4 Расчеты показывают снижение потерь в щеточном узле на 25–35 %, общих потерь ТЭД – на 4–5 %, и прирост КПД около 1 % в нагруженных режимах.

5 Улучшение условий коммутации снижает вероятность возникновения режима кругового огня в коллекторе, повышая надежность и продлевая ресурс коллекторно-щеточного узла.

## Список литературы

- 1 **Чернышова, Л. И.** Факторный анализ расхода электроэнергии на тягу поездов / Л. И. Чернышова // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2021. – № 11–2. – С. 326–330. – DOI 10.17513/vaael.1954. – URL: <https://vaael.ru/ru/article/view?id=1954> (дата обращения: 15.01.2026).
- 2 **Шрамко, С. Г.** Повышение эффективности эксплуатации электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения / С. Г. Шрамко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – Вып. 4 (111). – С. 192–199. – DOI 10.21285/1814-3520-2016-4-192-199.
- 3 **Волчек, Т. В.** Совершенствование методов контроля состояния коллекторного тягового электродвигателя при его эксплуатации / Т. В. Волчек, В. С. Томилов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4 (96). – С. 202–208. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_4\_202.
- 4 **Мустафин, А. Ш.** Повышение энергетической эффективности грузовых электровозов семейства «Ермак» путем модернизации при заводском ремонте / А. Ш. Мустафин // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – Вып. 2. – С. 75–91. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-2-75-91.
- 5 **Томилов, В. С.** Влияние блока балластных резисторов на КПД электрической цепи электровоза переменного тока / В. С. Томилов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (55). – С. 138–144. – DOI 10.20291/2079-0392-2022-3-138-144.
- 6 **Тихменев, Б. Н.** Электровозы переменного тока со статическими преобразователями / Б. Н. Тихменев. – Москва : Транспорт, 1958. – 268 с.
- 7 Разработка методики определения нарушения коммутационной устойчивости коллекторных тяговых электродвигателей / Т. В. Волчек, В. С. Томилов, Л. С. Курманова, Р. В. Волчек // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3 (99). – С. 72–79. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_72.
- 8 **Волчек, Т. В.** Повышение эффективности системы ослабления возбуждения тяговых электродвигателей электровозов переменного тока : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 29.30.00 / Волчек Татьяна Витальевна. – Москва, 2022. – 146 с.
- 9 **Иоффе, А. Б.** Тяговые электрические машины / А. Б. Иоффе. – Москва : Госэнергоиздат, 1967. – 248 с.

## References

- 1 **Chernyshova, L. I.** Factor analysis of electric power consumption for train traction / L. I. Chernyshova // Journal of Altai Academy of Economics and Law. – 2021. – No. 11–2. – P. 326–330. – DOI 10.17513/vaael.1954. – URL: <https://vaael.ru/ru/article/view?id=1954> (date of access: 15.01.2026).
- 2 **Shramko, S. G.** Improving the efficiency of operation of AC electric locomotives in the regenerative braking mode / S. G. Shramko // Proceedings of Irkutsk State Technical University. – 2016. – Iss. 4 (111). – P. 192–199.
- 3 **Volchek, T. V.** Improving the methods for monitoring the condition of a collector traction electric motor during its operation / T. V. Volchek, V. S. Tomilov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 4 (96). – P. 202–208. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_4\_202.
- 4 **Mustafin, A. Sh.** Improving the energy efficiency of freight electric locomotives of the “Ermak” family by modernizing them during factory repairs / A. Sh. Mustafin // Bulletin of Scientific Research Results. – 2022. – Iss. 2. – P. 75–91. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-2-75-91.
- 5 **Tomilov, V. S.** Influence of the ballast resistor block on the efficiency of the electric circuit of an AC electric locomotive / V. S. Tomilov // Herald of The Ural state university of railway transport. – 2022. – No. 3 (55). – P. 138–144. – DOI 10.20291/2079-0392-2022-3-138-144.
- 6 **Tikhmenev, B. N.** Electric locomotives of alternating current with static converters / B. N. Tikhmenev. – Moscow : Transport, 1958. – 268 p.
- 7 Development of a methodology for determining the violation of the switching stability of collector traction electric motors / T. V. Volchek, V. S. Tomilov, L. S. Kurmanova, R. V. Volchek // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 3 (99). – P. 72–79. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_72.
- 8 **Volchek, T. V.** Improving the efficiency of the excitation attenuation system of traction electric motors of AC electric locomotives : dissertation for the degree of candidate of technical sciences : 29.30.00 / Volchek Tatyana Vitalievna. – Moscow, 2022. – 146 p.
- 9 **Ioffe, A. B.** Traction electric machines / A. B. Ioffe. – Moscow : Gosenergoizdat, 1967. – 248 p.

10 Магистральные электровозы. Электрические машины и трансформаторное оборудование электровозов. / В. И. Бочаров, П. А. Золотарев, М. А. Козорезов [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1968. – 444 с.

10 Mainline electric locomotives. Electrical machines and transformer equipment of electric locomotives / V. I. Bocharov, P. A. Zolotarev, M. A. Kozorezov [et al.]. – Moscow : Mashinostroenie, 1968. – 444 p.

*V. S. Tomilov, T. V. Volchek*

### INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF AC ELECTRIC LOCOMOTIVES THROUGH ADAPTIVE CONTROL OF THE PHASE RELATIONSHIP OF ELECTRIC MOTOR FORCES IN THE TRACTION MOTOR

**Abstract.** This article explores improving the energy efficiency and reliability of commutator traction motors of AC electric locomotives by using adaptive control of the excitation winding's fixed shunt resistor. It is shown that rectified voltage pulsations in the excitation circuit generate a transformer EMF, which, with a fixed shunt resistance, provides a favorable EMF phase relationship only in a narrow range of operating conditions near the rated armature current. When deviating from the rated conditions, commutation conditions are disrupted, intense sparking occurs, and brush contact losses increase.

A solution is proposed based on the use of a controlled electronic switch in the shunt resistor circuit, allowing the equivalent resistance of the shunt branch to be adapted depending on the armature current. Estimates show that implementing adaptive control reduces brush losses by 15–20%, and overall traction motor losses by 4%.

**Keywords:** energy efficiency, traction motor, switching stability, controlled electronic switch, sparking, circular fire.

**For citation:** Tomilov, V. S. Increasing the energy efficiency of AC electric locomotives through adaptive control of the phase relationship of electric motor forces in the traction motor / V. S. Tomilov, T. V. Volchek // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 135–142. – DOI 10.46973/0201–727X\_2026\_1\_135.

#### Сведения об авторах

**Томилов Вячеслав Станиславович**

Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КрИЖТ ИрГУПС), кафедра «Эксплуатация железных дорог», кандидат технических наук, доцент, e-mail: vyach.tomiloff@yandex.ru

**Волчек Татьяна Витальевна**

Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КрИЖТ ИрГУПС), кафедра «Эксплуатация железных дорог», кандидат технических наук, доцент, e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

#### Information about the authors

**Tomilov Vyacheslav Stanislavovich**

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Branch of the Irkutsk State Transport University, Chair “Railway Operation”, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: vyach.tomiloff@yandex.ru

**Volchek Tatyana Vitalievna**

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Branch of the Irkutsk State Transport University (KrIRT IrSTU), Chair “Railway Operation”, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

*А. Н. Шмойлов*

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ МОСТОВОГО КРАНА В УСЛОВИЯХ ВАГОНРЕМОНТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

**Аннотация.** Статья посвящена разработке современной системы управления электроприводом мостового крана для вагоноремонтных предприятий. Актуальность работы обусловлена необходимостью замены устаревших релейно-контакторных систем, которые вызывают низкую точность позиционирования, раскачку груза и высокое энергопотребление. Цель исследования – создание адаптивной системы на базе частотного регулирования и программируемых логических контроллеров. Предложена методика оптимизации траекторий перемещения грузов с применением алгоритма  $A^*$ , учитывающая статические и динамические препятствия цеха. Разработана архитектура системы, включающая комплекс датчиков (положения, угла отклонения, массы, положения ротора) и логические блоки для активного гашения колебаний. Результаты вычислительных экспериментов подтвердили эффективность: сокращение времени цикла операций на 12 % и снижение энергопотребления на подъем груза на 19 %.

**Ключевые слова:** мостовой кран, вагоноремонтное предприятие, система управления электроприводом, частотное регулирование, точное позиционирование груза, оптимизация траектории, гашение колебаний груза.

**Для цитирования:** Шмойлов, А. Н. Разработка системы управления электрическим приводом мостового крана в условиях вагоноремонтного предприятия железнодорожного транспорта / А. Н. Шмойлов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 143–150. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_143.

### **Введение**

Эффективность и безопасность грузоподъемных операций на вагоноремонтных предприятиях железнодорожного транспорта являются критически важными факторами, определяющими ритмичность всего производственного цикла. Мостовые краны, как ключевое звено внутрицеховой логистики, обеспечивают перемещение массивных и габаритных узлов вагонов – от тележек и колёсных пар до кузовов. Однако эксплуатация кранового оборудования, оснащенного устаревшими релейно-контакторными системами управления электроприводами, сталкивается с рядом системных проблем: низкая точность позиционирования, значительное раскачивание груза, высокие динамические нагрузки на механическую часть и чрезмерное энергопотребление [4]. Эти недостатки напрямую влияют на производительность труда, качество ремонта и общую безопасность производства.

В условиях цифровой трансформации транспортной отрасли и реализации программ импортозамещения модернизация электроприводов мостовых кранов перестает быть задачей локальной оптимизации, а становится стратегическим элементом создания гибкого, технологичного и конкурентоспособного вагоноремонтного комплекса. Разработка современной системы управления, основанной на применении частотно-регулируемых электроприводов, программируемых логических контроллеров и интеллектуальных алгоритмов, направлена на преодоление указанных ограничений [2]. Такая система призвана обеспечить плавный и точный ход всех механизмов крана, автоматическое гашение колебаний груза, адаптацию к изменяющейся массе и, как следствие, – существенное повышение производительности, энергоэффективности и безаварийности работы в специфических условиях ремонтного предприятия [1, 3].

### **Цель научной разработки**

Целью данной работы является разработка архитектуры и алгоритмов системы управления электроприводом мостового крана, адаптированной к технологическим требованиям и жестким условиям эксплуатации вагоноремонтного производства, с обоснованием ее технико-экономической эффективности и безопасности.

### **Основная часть**

Грузоподъемные операции на вагоноремонтных предприятиях железнодорожного транспорта характеризуются высокой сложностью, разнообразием и строгими требованиями к точности и безопасности. Мостовые краны являются центральным звеном технологического процесса [5].

Специфика и главные технические особенности грузоподъемных операций заключены в следующем:

1 Высокая масса и габариты: Масса одной тележки может превышать 5 тонн, кузова вагона – 20–40 тонн.

2 Нестандартные точки строповки: Центр массы сложных узлов (например, кузова с неснятым оборудованием) часто смещен, что требует особых схем строповки для сохранения горизонтальности.

3 Необходимость прецизионного позиционирования при выполнении грузоподъемных операций на вагоноремонтных предприятиях железнодорожного транспорта.

4 Работа в стесненных условиях цеха: Требуется высокая маневренность и обзорность для оператора среди другого оборудования, ступеней и персонала.

На предприятиях используются несколько типов кранов, выполняющих специализированные задачи. Опорные мостовые краны грузоподъемностью 20–80 тонн: основная рабочая лошадка для тяжелых операций по перемещению кузовов и тележек.

Специфика ремонтного производства формирует особые требования к крановому оборудованию:

1 Режимы работы: краны работают в повторно-кратковременном режиме (40–60 %) с частыми пусками, остановками и реверсами.

2 Точность управления: ключевое значение имеют режимы работы на минимальной скорости (до 0,5–1 м/мин).

3 Надежность и безопасность: обязательно наличие дублирующих систем торможения, ограничителей грузоподъемности, защиты от перекаса и системы контроля приближения к препятствиям.

Необходимость точного перемещения грузов мостовыми кранами на вагоноремонтном предприятии является критическим и многофакторным требованием, от которого напрямую зависят безопасность, качество ремонта, производительность и экономическая эффективность всего производства [8].

Неточное, раскачивающееся перемещение многотонных узлов (кузовов, тележек) создает прямую угрозу жизни и здоровью рабочих в цехе. Столкновение с другим оборудованием или конструкциями может привести к катастрофе.

Вагоны и их узлы – это дорогостоящее имущество. Удар при неточной установке может привести к деформациям, повреждению ответственных поверхностей, требующих дорогостоящего исправительного ремонта. Для пассажирских вагонов это также риск повреждения интерьера и внешней отделки. Снижение простоев: каждая неудачная попытка позиционирования груза из-за раскачивания или неточного управления ведет к простоям высокооплачиваемых специалистов (слесарей, сварщиков) и всего участка сборки. Повреждения, вызванные неточной установкой, создают дополнительные объемы неучтенного ремонта, увеличивая время нахождения вагона в депо и расход материалов. Резкие рывки и коррекции при неточном управлении приводят к повышенному пиковому энергопотреблению электроприводов крана.

Переход к поточному (конвейерному) методу ремонта, который активно внедряется на ОАО «РЖД» для повышения эффективности, абсолютно невозможен без точного автоматизированного позиционирования. В такой системе кран должен доставлять узлы в строго заданные точки и с высокой повторяемостью, что исключительно силами оператора-человека обеспечить крайне сложно.

Таким образом, точность перемещения – это не просто «удобство», а фундаментальное технологическое требование.

Именно это требование делает модернизацию систем управления кранами (с внедрением частотного регулирования, автоматического гашения раскачивания и систем точного позиционирования) не просто опциональным улучшением, а стратегической необходимостью для современного вагоноремонтного предприятия [7, 9]. Без этого невозможно обеспечить ни конкурентоспособность, ни соответствие растущим стандартам безопасности и качества [6].

Разработана методика оптимизации технологических параметров рабочего процесса грузоподъемного крана по принятым критериям устойчивости перемещения груза.

Оптимизация перемещения груза мостовым краном является классической задачей управления, где ключевыми критериями выступают время цикла, минимизация раскачки груза, энергопотребление и безопасность [8]. В реальных условиях, таких как вагоносборочный цех вагоноремонтного предприятия, траектория движения крана ограничена стационарными препятствиями: колоннами, другим оборудованием, элементами конструкций [10].

Для отладки алгоритмов планирования траекторий и управления (например, ПИД-регуляторов) необходим контролируемый эталонный сценарий. Таким сценарием является вычислительный эксперимент на тестовом примере с детерминированным (фиксированным и заранее известным) расположением препятствий.

Детерминированность окружения – ключевое условие, обеспечивающее чистоту эксперимента и возможность однозначной интерпретации его результатов, что служит основой для создания надежных и безопасных систем автоматизированного управления мостовыми кранами.

В виде объекта для исследований выбран мостовой двухбалочный опорный кран, работающий в вагоносборочном цеху вагоноремонтного предприятия. Грузоподъемность крана равна 20 т.

Целевая функция  $F_{\text{неопт}}$  объединяет ключевые параметры с весовыми коэффициентами:

$$F_{\text{неопт}} = \omega_1 \cdot \frac{T_{\text{цикл}}}{T_0} + \omega_2 \cdot \frac{\theta_{\text{макс}}}{\theta_0} + \omega_3 \cdot \frac{E}{E_0} + \omega_4 \cdot P_{\text{риска}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $T_{\text{цикл}}$  – время цикла (с);  $T_0 = 240$  с – базовое время;  $\theta_{\text{макс}}$  – максимальный угол раскачки груза (рад),  $\theta_0 = 0,5$  рад – максимальный угол раскачки без системы управления;  $E = 1,69$  кВт·ч – энергопотребление;  $E_0 = 1,47$  кВт·ч – базовое энергопотребление на подъём груза;  $P_{\text{риска}}$  – вероятность возникновения опасной ситуации (безразмерная величина от 0 до 1);  $\omega_1 = 0,25$  (время цикла),  $\omega_2 = 0,35$  (раскачка груза),  $\omega_3 = 0,25$  (энергопотребление),  $\omega_4 = 0,15$  (безопасность) – весовые коэффициенты важности параметров.

Целевая функция для оптимизированной траектории.

$$F_{\text{опт}} = \alpha \cdot \frac{T_{\text{ц,нов}}}{T_0} + \beta \cdot \frac{\theta_{\text{нов}}}{\theta_0} + \gamma \cdot \frac{E_{\text{нов}}}{E_0} + \delta \cdot \left(1 - \frac{d_{\text{мин}}}{d_0}\right) + \varepsilon \cdot \frac{a_{\text{макс}}}{a_0} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $T_{\text{ц,нов}}$  – минимизированное время цикла (с);  $\theta_{\text{нов}}$  – среднеквадратичное отклонение угла раскачки (рад) за весь цикл;  $E_{\text{нов}}$  – минимизированное энергопотребление (кВт·ч);  $d_{\text{мин}}$  – минимальное расстояние до препятствий (м) как показатель безопасности;  $a_{\text{макс}}$  – максимальное ускорение механизмов ( $\text{м}/\text{с}^2$ ), ограниченное нормами безопасности.

Нормирующие значения:  $T_0 = 240$  с;  $\theta_0 = 0,5$  рад;  $E_0 = 1,47$  кВт·ч;  $d_0 = 2,0$  м (безопасное расстояние до препятствий);  $a_0 = 0,5$   $\text{м}/\text{с}^2$  (нормативное ограничение ускорений).

Коэффициенты важности:  $\alpha = 0,20$  (время);  $\beta = 0,30$  (раскачка);  $\gamma = 0,25$  (энергия);  $\delta = 0,15$  (безопасность по расстоянию);  $\varepsilon = 0,10$  (ограничение ускорений).

Линейный график сравнения значений целевой функции представлен на рис. 1.

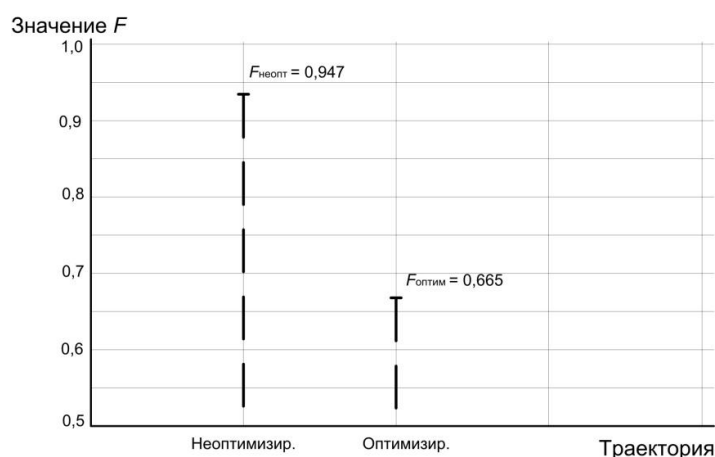


Рис. 1. Линейный график сравнения значений целевой функции

Значение целевой функции снизилось на 29,7 %, что свидетельствует о значительном улучшении комплексной эффективности работы крана после внедрения системы управления.

В рамках вычислительного эксперимента моделировались следующие типовые операции, характерные для вагоноремонтного предприятия: захват груза (снятие детали с ремонтного стенда или

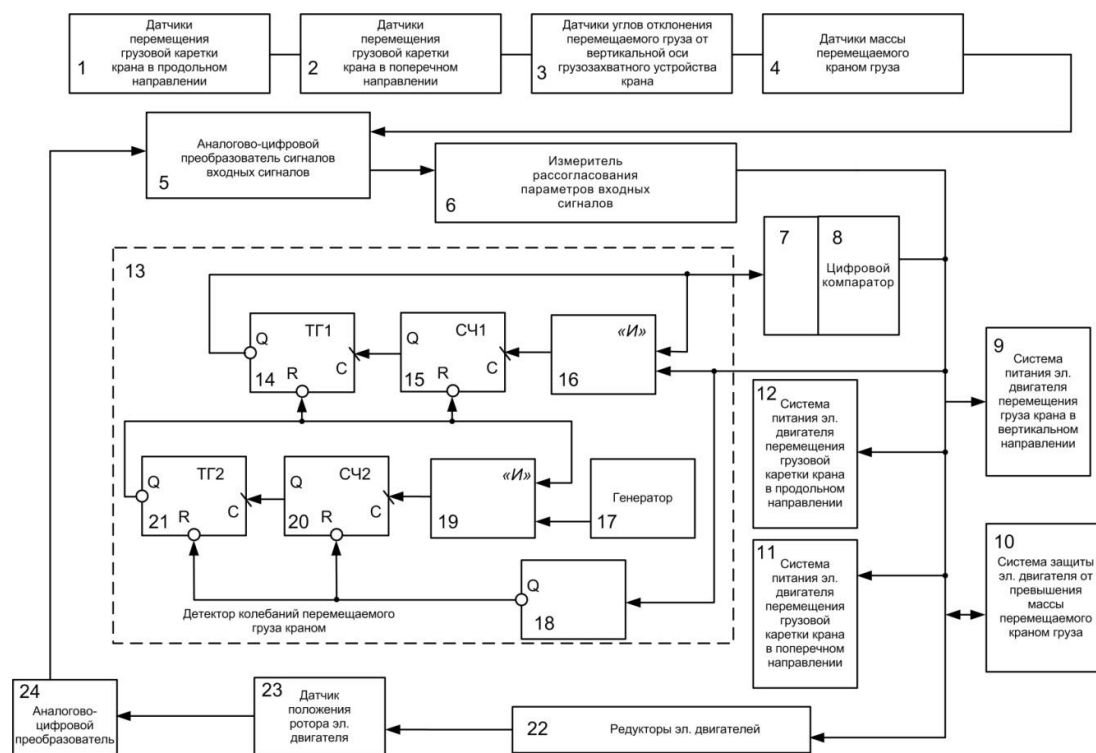
стеллажа); подъём груза на безопасную высоту (1–1,5 м над препятствиями); перемещение тележки вдоль моста для позиционирования над зоной разгрузки; перемещение моста вдоль цеха к месту установки детали; опускание груза с точной установкой на монтажную позицию; освобождение грузозахватного устройства (отцепка строп/крюка); возврат в исходное положение (холостой ход к следующей точке захвата); цикл повторялся 10 раз для каждого сценария (оптимизированного и неоптимизированного) для усреднения результатов.

Исходные данные следующие: грузоподъёмность = 20 т; скорость подъёма груза = 0,2 м/с; высота подъёма = 15 м; скорость перемещения тележки = 20 м/мин; скорость перемещения моста = 10 м/мин; время захвата и разгрузки груза = 10 с; время паузы при погрузке/разгрузке = 20 с; время подъема и время опускания груза = 75 с; КПД двигателя без системы управления = 0,85; мощность двигателя = 60 кВт; базовое энергопотребление на подъём груза с учетом КПД двигателя = 1,47 кВт·ч.

Топология цеха задавалась в виде 2D-карты рабочей зоны с координатной сеткой (шаг 0,5 м). На карту наносились: статические препятствия: колонны, стационарное оборудование, ремонтные стенды, коммуникации; динамические препятствия: другие краны, транспортные средства, персонал (моделировались как временные зоны запрета); безопасные коридоры: выделенные пути перемещения для минимизации риска столкновений; ограничения по высоте: зоны с низкой подвеской коммуникаций или светильников.

Алгоритм учёта препятствий: для неоптимизированной траектории – маршрут строился по кратчайшему пути с обходом препятствий по фиксированным «коридорам»; для оптимизированной траектории – применялся алгоритм А (A-star)\* для поиска кратчайшего безопасного пути с учётом текущей конфигурации препятствий. Для проведения вычислительного эксперимента использовались следующие программные продукты: MATLAB/Simulink, Python (библиотеки NumPy, SciPy, MaPlotLib).

Приведенные выше исследования легли в основу разработанной системы управления электрическим приводом мостового крана в условиях вагоноремонтного предприятия железнодорожного транспорта. Блок-схема основных модулей и блоков данной системы приведена на рис. 2.



**Рис. 2. Блок-схема основных модулей и блоков системы управления электрическим приводом мостового крана в условиях вагоноремонтного предприятия железнодорожного транспорта**

Блок-схема основных модулей и блоков системы управления электрическим приводом мостового крана содержит следующие основные элементы и блоки: 1 – датчики перемещения грузовой каретки крана в продольном направлении, 2 – датчики перемещения грузовой каретки крана в попереч-

ном направлении, 3 – датчики углов отклонения перемещаемого груза от вертикальной оси грузозахватного устройства крана, 4 – датчики массы перемещаемого краном груза, 5 – аналогово-цифровой преобразователь сигналов входных сигналов, 6 – измеритель рассогласования параметров входных сигналов, 7 – блок изменения зоны нечувствительности, 8 – цифровой компаратор, 9 – система питания электродвигателя перемещения груза крана в вертикальном направлении, 10 – система защиты электродвигателя от превышения массы перемещаемого краном груза, 11 – система питания электродвигателя перемещения грузовой каретки крана в поперечном направлении, 12 – система питания электродвигателя перемещения грузовой каретки крана в продольном направлении, 13 – Детектор колебаний перемещаемого груза краном, 14 – первый счетный триггер, 15 – первый счетчик, 16 – первый логический блок «И», 17 – генератор, 18 – инвертор, 19 – второй логический блок «И», 20 – второй счетчик, 21 – второй счетный триггер, 22 – редукторы электродвигателей, 23 – датчик положения ротора электродвигателя, 24 – аналогово-цифровой преобразователь.

На основе представленной блок-схемы можно выделить следующие технические особенности системы управления электрическим приводом мостового крана:

1 Многокомпонентная система датчиков для контроля параметров: датчики перемещения (1, 2) отслеживают положение грузовой каретки в продольном и поперечном направлениях, обеспечивая точность позиционирования, датчики угла отклонения груза (3) контролируют колебания груза относительно вертикальной оси, что критично для безопасности и минимизации раскачки, датчик массы груза (4) позволяет оценивать нагрузку на механизмы крана, датчик положения ротора электродвигателя (23) обеспечивает обратную связь по углу поворота вала двигателя для точного управления.

2 Цифровая обработка сигналов и адаптивность: аналогово-цифровые преобразователи (5, 24) переводят сигналы от датчиков в цифровой формат для дальнейшей обработки, блок изменения зоны нечувствительности (7) позволяет адаптировать систему к внешним условиям (например, ветру или вибрациям), игнорируя незначительные отклонения, измеритель рассогласования (6) и цифровой компаратор (8) сравнивают текущие параметры с заданными, формируя сигналы для корректировки работы двигателей.

3 Система управления двигателями с обратной связью: системы питания электродвигателей (9, 11, 12) регулируют движение груза по трём осям: вертикальной, поперечной и продольной, редукторы электродвигателей (22) обеспечивают необходимое передаточное отношение для точного и плавного перемещения, обратная связь через датчик положения ротора (23) позволяет реализовать замкнутый контур управления, повышая точность позиционирования.

4 Безопасность и защита от перегрузок: система защиты от превышения массы груза (10) предотвращает перегрузку двигателей и механических частей крана, детектор колебаний груза (13) совместно с счётными триггерами (14, 21), счётчиками (15, 20) и логическими блоками (16, 19) анализирует амплитуду и частоту колебаний, формируя сигналы для их подавления.

5 Логические и счётные элементы для подавления колебаний: генератор (17) и инвертор (18) создают управляющие импульсы для корректировки движения, счётные триггеры и счётчики (14–15, 20–21) подсчитывают количество колебаний и их параметры, что позволяет системе динамически реагировать на раскачку груза.

Далее в работе был проведен расчет ожидаемого эффекта от внедрения системы управления электрическим приводом мостового двухбалочного опорного крана.

Время цикла (базовое) рассчитываем по следующей формуле:

$$T_{ц. баз.} = t_{захват} + t_{под} + t_{тележка} + t_{мост} + t_{пуск} + t_{разгрузка} + t_{пауза}. \quad (3)$$

Учитывая, что время перемещения тележки и моста составляет 30 с каждое, получим следующий расчет:

$$T_{ц. баз.} = 10 + 75 + 30 + 30 + 75 + 10 + 20 = 240 \text{ с.}$$

Энергопотребление на подъём груза после внедрения новой системы управления снизилось до 1,19 кВт·ч за счёт плавного пуска и торможения.

Новое время цикла после внедрения новой системы управления на основании замеров времени снизилось до 211,2 с.

Определим относительное сокращение времени цикла по формуле:

$$\text{Сокращение, \%} = \left( \frac{T_{\text{ц.баз.}} - T_{\text{ц.новая}}}{T_{\text{ц.баз.}}} \right) \times 100 \%, \quad (4)$$

где  $T_{\text{ц. баз.}}$  – время цикла до внедрения системы,  $T_{\text{ц. новая}}$  – после.

$$\text{Сокращение, \%} = \left( \frac{240 - 211,2}{240} \right) \times 100 \% = 12 \%$$

Новое время цикла после внедрения новой системы управления на основании замеров времени снизилось на 12 %.

Рассчитаем относительное снижение энергопотребления по формуле:

$$\text{Снижение, \%} = \left( \frac{W_{\text{ц.баз.}} - W_{\text{ц.новая}}}{W_{\text{ц.баз.}}} \right) \times 100 \%, \quad (5)$$

где  $W_{\text{ц. баз.}}$  – энергопотребление до внедрения системы,  $W_{\text{ц. новая}}$  – после.

$$\text{Сокращение, \%} = \left( \frac{1,47 - 1,19}{1,47} \right) \times 100 \% = 19 \%$$

Энергопотребление на подъём груза после внедрения новой системы управления снизилось на 19 %.

Представленная система управления сочетает точное позиционирование, активное подавление колебаний груза и защиту от перегрузок, что особенно важно для работы мостовых кранов в условиях вагоноремонтных предприятий, где требуется высокая безопасность и координация движений в стеснённом пространстве.

Новизна работы заключается в разработке адаптивной системы управления электроприводом мостового крана, специализированной для условий вагоноремонтного предприятия. Ключевые новые элементы:

- методика оптимизации траекторий перемещения груза с применением алгоритма  $A^*$ , учитывающая статические и динамические препятствия цеха;
- многокомпонентная архитектура системы с комплексом датчиков (положения, угла отклонения груза, массы, положения ротора) и логическими блоками для точного позиционирования и активного гашения колебаний;
- многокритериальная целевая функция (время, раскочка, энергопотребление, безопасность) для оценки эффективности.

### **Выводы**

Проведённые исследования и разработка системы управления электрическим приводом мостового крана подтвердили возможность принципиального повышения эффективности и безопасности грузоподъемных операций на вагоноремонтных предприятиях железнодорожного транспорта. Модернизация, направленная на замену устаревших релейно-контакторных систем современной цифровой автоматикой, является стратегической необходимостью в контексте цифровизации отрасли и перехода к поточным методам ремонта.

В результате проведенной работы можно сформулировать следующие основные выводы:

1 Актуальность модернизации: эксплуатация мостовых кранов с устаревшими релейно-контакторными системами управления на вагоноремонтных предприятиях приводит к низкой точности позиционирования, значительному раскачиванию грузов и повышенному энергопотреблению, что требует разработки современных адаптивных систем управления.

2 Методика оптимизации траекторий: предложена методика оптимизации технологических параметров рабочего процесса крана, основанная на многокритериальной целевой функции, учитывающей время цикла, раскочку груза, энергопотребление и безопасность. Применение алгоритма  $A^*$  ( $A^*$ -star) для планирования пути позволяет эффективно обходить статические и динамические препятствия в условиях цеха.

3 Архитектура системы управления: разработана блок-схема системы управления, ключевыми особенностями которой являются: многокомпонентный датчиковый комплекс (положение, масса, угол отклонения груза), цифровая обработка сигналов, замкнутый контур управления двигателями, а также наличие логических блоков для активного подавления колебаний груза и защиты от перегрузок.

4 Техничко-экономическая эффективность: результаты вычислительных экспериментов и расчетов подтверждают эффективность предложенной системы. Ее внедрение позволяет сократить время рабочего цикла крана на 12 % (с 240 до 211,2 с) и снизить энергопотребление на подъем груза на 19 % (с 1,47 до 1,19 кВт·ч), а также улучшить комплексный показатель эффективности (целевую функцию) на 29,7 %.

### Список литературы

1 **Воронцов, Д. С.** Применение данных с регистраторов параметров работы крана с целью определения ресурса работы грузоподъемных кранов с истекшим сроком службы / Д. С. Воронцов // *European Science*. – 2015. – № 3 (4). – С. 10–17. – ISSN 2410-2865.

2 **Иванов, С. Д.** Оценка применимости электрических параметров привода для определения нагрузки на механизм подъема кранов мостового типа / С. Д. Иванов, А. Н. Назаров // *Вестник СибАДИ*. – 2022. – Т. 19, № 1 (83). – С. 36–47. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47.

3 **Калюжный, С. В.** Оригинальная конструкция токопараметрического преобразователя для электроприводов мостового крана / С. В. Калюжный, Д. А. Харченко // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. – 2019. – № 14 (57). – С. 88–93. – ISSN 2077-1738.

4 **Климаш, В. С.** Повышение энергетической эффективности комплекса подъемных кранов / В. С. Климаш, М. А. Соколовский // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2020. – С. 34–40. – ISSN 2311-8318.

5 **Луцко, Т. В.** Определение влияния режима нагружения на продление срока службы мостового крана / Т. В. Луцко, А. В. Бартедьев // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. – 2019. – № 6 (140). – С. 76–82. – ISSN 1814-3296.

6 Расчетно-экспериментальные подходы к анализу обеспечения ресурса и срока безопасной эксплуатации промышленных объектов / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин, А. С. Печёркин, Б. А. Красных // *Безопасность труда в промышленности*. – 2020. – № 1. – С. 7–15. – ISSN 0409-2961.

7 Разработка системы мониторинга состояния грузоподъемных механизмов / В. В. Мокшин, И. М. Якимов, А. П. Кирпичников, Л. М. Шарнин // *Вестник Технологического университета*. – 2017. – Т. 20, № 19. – С. 75–81. – ISSN 3034-4689.

8 **Назаров, А. Н.** Разработка перспективного прибора безопасности кранов мостового типа / А. Н. Назаров, С. Д. Иванов // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. – 2024. – Т. 21, № 6 (100). – С. 826–843. – DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843.

### References

1 **Vorontsov, D. S.** Application of data from crane operation parameter recorders to determine the service life of hoist cranes with expired service life / D. S. Vorontsov // *European Science*. – 2015. – No. 3 (4). – P. 10–17. – ISSN 2410-2865.

2 **Ivanov, S. D.** Assessment of the applicability of electrical drive parameters for determining the load on the lifting mechanism of bridge-type cranes / S. D. Ivanov, A. N. Nazarov // *Vestnik SibADI (The Russian Automobile and Highway Industry Journal)*. – 2022. – Vol. 19, No. 1 (83). – P. 36–47. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47.

3 **Kalyuzhny, S. V.** Original design of a current-parametric converter for bridge crane electric drives / S. V. Kalyuzhny, D. A. Kharchenko // *Collection of scientific papers of Donbass State Technical University*. – 2019. – No. 14 (57). – P. 88–93. – ISSN 2077-1738.

4 **Klimash, V. S.** Improving the energy efficiency of a complex of hoisting cranes / V. S. Klimash, M. A. Sokolovsky // *Electrical Systems and Complexes*. – 2020. – P. 34–40. – ISSN 2311-8318.

5 **Lutsko, T. V.** Determining the influence of the loading mode on extending the service life of a bridge crane / T. V. Lutsko, A. V. Bartenyev // *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. – 2019. – No. 6 (140). – P. 76–82. – ISSN 1814-3296.

6 Calculation and experimental approaches to the analysis of ensuring the resource and safe operation period of industrial facilities / N. A. Makhutov, M. M. Gadenin, A. S. Pechorkin, B. A. Krasnykh // *Occupational Safety in Industry*. – 2020. – No. 1. – P. 7–15. – ISSN 0409-2961.

7 Development of a system for monitoring the condition of load-lifting mechanisms / V. V. Mokshin, I. M. Yakimov, A. P. Kirpichnikov, L. M. Sharnin // *Bulletin of the Technological University*. – 2017. – Vol. 20, No. 19. – P. 75–81. – ISSN 3034-4689.

8 **Nazarov, A. N.** Development of a promising safety device for bridge-type cranes / A. N. Nazarov, S. D. Ivanov // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. – 2024. – Vol. 21, No. 6 (100). – P. 826–843. – DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843.

9 **Пушенко, С. Л.** Модель оптимизации решений по снижению риска охраны труда / С. Л. Пушенко // Инженерный вестник Дона. – № 1 (19). – 2012. – С. 117–120. – ISSN 2073-8633.

10 **Щеглова, Е. В.** Оптимизация металлоконструкции мостового ремонтного крана, обслуживающего козловой кран 2'180 тонн на саратовской гидроэлектростанции / Е. В. Щеглова, А. П. Кобзев // Математические методы в технике и технологиях. – ММТТ. – 2013. – № 13-2 (59). – С. 119–121. – ISSN 2587-9049.

9 **Pushchenko, S. L.** Optimization Model of Decisions on Reducing Occupational Safety Risks / S. L. Pushchenko // Engineering Journal of the Don. – No. 1 (19). – 2012. – P. 117–120. – ISSN 2073-8633.

10 **Scheglova, E. V.** Optimization of the metal structure of a bridge repair crane serving a 2'180-ton gantry crane at the Saratov Hydroelectric Power Plant / E. V. Scheglova, A. P. Kobzev // Mathematical Methods in Technics and Technologies. – MMTT. – 2013. – No. 13-2 (59). – P. 119–121. – ISSN 2587-9049.

*A. N. Shmoilov*

### DEVELOPMENT OF AN ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM FOR A BRIDGE CRANE IN A RAILWAY CARRIAGE REPAIR FACILITY

**Abstract.** The article is devoted to the development of a modern electric drive control system for bridge cranes in railway repair facilities. The relevance of the work is due to the need to replace outdated relay-contactor systems, which cause low positioning accuracy, cargo oscillation, and high energy consumption. The objective of the study is to create an adaptive system based on frequency control and programmable logic controllers. A method for optimizing cargo movement trajectories using the A\* algorithm is proposed, taking into account the static and dynamic obstacles in the workshop.

The system architecture has been developed, which includes a complex of sensors (position, angle of deviation, mass, rotor position) and logical blocks for active vibration damping. The results of computational experiments have confirmed the effectiveness: reducing the cycle time of operations by 12 % and reducing energy consumption for lifting the load by 19 %.

**Keywords:** bridge crane, car repair facility, electric drive control system, frequency control, precise cargo positioning, trajectory optimization, and cargo vibration damping.

**For citation:** Shmoilov, A. N. Development of an electric drive control system for a bridge crane in a railway carriage repair facility / A. N. Shmoilov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 143–150. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_143.

#### Сведения об авторах

**Шмойлов Андрей Николаевич**  
Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС),  
кафедра «Вагонное хозяйство и наземные транспортные комплексы»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: Shmoilov@inbox.ru

#### Information about the authors

**Shmoilov Andrey Nikolaevich**  
Volga State Transport University (VSTU),  
Chair “Carriage Industry and Land Transport Complexes”,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: Shmoilov@inbox.ru

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 678.7 + 06

DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_151

А. М. Ананко

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ  
ВВЕДЕНИЕМ МИКРОКАПСУЛИРОВАННЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
И ЧАСТИЦ ОКСИДА МАГНИЯ \***

**Аннотация.** Износ полимерных материалов в узлах трения транспортной техники определяет ресурс и надёжность подвижного состава. Цель работы – повышение износостойкости эпоксидных композитов на основе смолы ЭД-20 путём введения частиц оксида магния (MgO) и полиэфирных микрокапсул со смазочным наполнителем. Микрокапсулы размером 5–30 мкм синтезированы методом межфазной поликонденсации себацилхлорида с многоатомными спиртами. Физико-механические свойства определены индентированием (NanoTest 600), трибологические характеристики – на машине трения ИИ-5018 по схеме «вал – палец» при нагрузке 55 Н и пути трения 2200 м. Установлен оптимальный состав – ЭД-20 + 1 мас.% MgO + 1 мас.% микрокапсул А237 (масло И-40), обеспечивающий снижение интенсивности износа на 82 % (с 55,2 до 10,2 мг/м) и коэффициента трения с 0,40 до 0,23. Параметр пластичности  $H^3/Et^2$  возрос на 15,9 %. Методами ИК-НПВО и СЭМ-ЭДС выявлен циклический механизм формирования композитного трибослоя из частиц MgO, фрагментов эпоксидной матрицы и смазочного масла. Результаты применимы для разработки самосмазывающихся полимерных материалов узлов трения рельсового транспорта.

**Ключевые слова:** эпоксидные композиты, трибология, износостойкость, микрокапсулы, оксид магния, самосмазывающиеся материалы, вторичные структуры, сухое трение, индентирование, полимерные композиционные материалы.

**Для цитирования:** Ананко, А. М. Повышение износостойкости эпоксидных композитов введением микрокапсулированных смазочных материалов и частиц оксида магния / А. М. Ананко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 151–160. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_151.

**Введение**

Износ полимерных деталей в узлах трения транспортных машин ограничивает межремонтный ресурс подвижного состава и повышает эксплуатационные расходы [1–3]. Потери на трение и износ составляют до 23 % мирового потребления энергии, из которых значительная доля приходится на полимерные трибосопряжения [3]. Эпоксидные смолы занимают особое место среди конструкционных полимеров благодаря высокой адгезии, химической стойкости и технологичности переработки [4–6]. В транспортной технике эпоксидные композиты применяют в подшипниках скольжения, направляющих, уплотнениях и антифрикционных покрытиях.

Основной недостаток неармированных эпоксидных полимеров – низкая стойкость к абразивному и адгезионному износу при сухом трении [7]. Традиционные подходы к повышению износостойкости включают введение твёрдых наполнителей ( $B_4C$ , SiC,  $Al_2O_3$ , MgO), антифрикционных добавок (PTFE,  $MoS_2$ , графит) и армирующих волокон [1, 2, 7, 8–10]. Дисперсные оксидные наполнители ( $Al_2O_3$ , MgO) формируют в матрице каркасную структуру, повышая твёрдость и модуль упругости при содержании 1–5 мас.% [9]. Однако при превышении оптимальной концентрации наступает агломерация частиц и охрупчивание матрицы [6, 7].

Перспективное направление – создание самосмазывающихся композитов на основе микрокапсулированных смазочных материалов [11–13]. Концепция, предложенная S.R. White et al. [11], предполагает размещение в полимерной матрице капсул с жидким агентом, который высвобождается при разрушении оболочки в зоне трения. Микрокапсулы обеспечивают автономное смазывание трибоконтакта без внешней подачи смазки [12, 14]. Трибологические исследования самосмазывающихся полимерных композитов показали снижение износа на 42–75 % в зависимости от типа и концентрации капсул [14].

Научная новизна настоящей работы состоит в реализации синергетического подхода: совместное введение микронных частиц MgO и полиэфирных микрокапсул со смазочным маслом в эпоксидную

\* Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 21-19-00288.

матрицу. MgO выполняет функцию структурного армирования и теплоотвода, а микрокапсулы – функцию резервуара смазки. Совместное действие двух наполнителей направлено на формирование стабильного композитного трибослоя (вторичных структур) на поверхности контртела [15, 16].

Таким образом, остаётся недостаточно изученным совместное влияние структурного оксидного наполнителя и капсул со смазочным материалом в эпоксидной матрице, в частности с точки зрения связи локальных механических свойств ( $H^3/Er^2$ ) и износостойкости.

Цель работы – установить закономерности влияния гибридного наполнителя (MgO, микрокапсулированных смазочных материалов) на механические и трибологические характеристики эпоксидных композитов, и выявить механизм формирования вторичных структур в зоне фрикционного контакта.

### **Материалы и методы**

Полиэфирные микрокапсулы синтезированы методом межфазной поликонденсации себацилхлорида с многоатомными спиртами [13, 17]. Процедура включала приготовление эмульсии «масло в воде» с применением эмульгатора Polysorb-20. Водную фазу (0,478 г себацилхлорида, 0,5 г Polysorb-20) смешивали с масляной фазой, содержащей 2 мл смазочного масла, и гомогенизировали при 50 °С в течение 5 мин. Далее добавляли 0,5 г Polysorb-20, 0,8 г многоатомного спирта и 0,5 мл воды; реакция поликонденсации проводилась 5 мин при перемешивании. Полученную суспензию выдерживали 24 ч, центрифугировали при 5000 об/мин, промывали и сушили [17].

Синтезированы три типа микрокапсул с различным смазочным ядром (табл. 1).

Таблица 1

### **Характеристики синтезированных микрокапсул**

Шифр	Смазочное ядро	Размер, мкм	Толщина оболочки, мкм	Выход, %
A237	Масло И-40	8–12	0,5–1,0	87
A241	Подсолнечное масло	10–15	0,8–1,2	85
A481	Диоктилсебацинат (ДОС)	7–10	0,4–0,8	88

Микрокапсулы представляют собой сферические частицы размером 5–30 мкм с полиэфирной оболочкой толщиной 0,4–1,2 мкм. Средний выход продукта составил 85–88 %, что свидетельствует о высокой эффективности синтеза.

В качестве структурного наполнителя использовали порошок оксида магния MgO с размером частиц 6–20 мкм [8]. Концентрация MgO в композите варьировалась: 1, 3 и 5 мас. %.

Матрицей служила эпоксидная смола ЭД-20, отверждаемая полиэтиленполиамином (ПЭПА). Процедура изготовления: (1) механическое диспергирование MgO в смоле ЭД-20 мешалкой Heidolph RZR 2041; (2) введение микрокапсул при постоянном перемешивании (455 об/мин); (3) дегазация в течение 20 мин; (4) введение отвердителя ПЭПА; (5) заливка в формы и отверждение 5 мин; (6) выдержка при комнатной температуре 1 ч; (7) окончательное отверждение при 20 °С в течение 24 ч [7, 8].

Составы образцов систематизированы в табл. 2.

Таблица 2

### **Составы исследованных композитов**

Группа	Шифр	Состав
1	106	ЭД-20 (контроль)
1	116	ЭД-20 + 1 % MgO
1	117	ЭД-20 + 3 % MgO
1	118	ЭД-20 + 5 % MgO
2	134	ЭД-20 + 1 % A237 (И-40)
2	135	ЭД-20 + 1 % A241
2	139	ЭД-20 + 1 % A481
3	142	ЭД-20 + 1 % MgO + 1 % A237
3	143	ЭД-20 + 1 % MgO + 1 % A241
3	144	ЭД-20 + 1 % MgO + 1 % A481

Твёрдость (H), приведённый модуль упругости (Er), соотношения H/Er и  $H^3/Er^2$  определены на приборе NanoTest 600 методом инструментального индентирования [18] в рамках гипотезы изотропности и упругости получаемых композитов. Для изотропного вязкоупругого тела механические параметры материала были представлены в работе [19]. Для исследования применялся сфероконический алмазный индентор с углом конусности  $120^\circ$  и радиусом скругления 100 мкм. Нагрузка – 120 мН, скорость нагружения – 0,5 мН/с, выдержка при максимальной нагрузке – 100 с, скорость разгрузки – 0,05 мН/с. На каждом образце выполнено 10 замеров. Обработка кривых нагружения-разгрузки проведена по методу Оливера – Фарра [18, 20].

Износ определён на машине трения ИИ-5018 по схеме «вал – палец» [16]. Контртело – стальной ролик (45–50 HRC, Ra ≤ 0,1 мкм), скорость вращения – 90 об/мин, нагрузка – 55 Н, путь трения – 2200 м. Испытания проводились в условиях сухого трения при комнатной температуре. Массовый износ определяли взвешиванием на весах ВЛ-210-С (точность 0,0001 г). Интенсивность износа рассчитана как отношение массового износа (m) к пути трения (L).

Инфракрасные спектры нарушенного полного внутреннего отражения записаны на спектрометре Nicolet 380 (Thermo Scientific) с приставкой Smart iTR (кристалл ZnSe) в диапазоне  $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$  с разрешением  $4\text{ см}^{-1}$ , число сканов – 32 [21, 22]. Анализировали поверхность трения образцов после испытаний длительностью 0, 30, 60, 120 и 180 мин.

Морфологию поверхности трения и элементный состав трибослоя исследовали на сканирующем электронном микроскопе ZEISS EVO MA18 с энергодисперсионным детектором X-Max 50N (программа AZtec). Ускоряющее напряжение – 8–9 кВ, рабочее расстояние – 40–60 мм.

### Результаты и обсуждение

Результаты индентирования систематизированы в табл. 3. Параметр  $H^3/Er^2$  характеризует сопротивление материала пластической деформации и используется в качестве прогностического критерия износостойкости [19, 20].

Таблица 3

Результаты индентирования композитов

Шифр	Состав	H, ГПа	Er, ГПа	H/Er	$H^3/Er^2, \times 10^{-3}$	$\Delta H^3/Er^2, \%$
106	ЭД-20	$0,279 \pm 0,005$	$5,82 \pm 0,12$	0,048	0,641	–
116	1 % MgO	$0,286 \pm 0,008$	$5,93 \pm 0,20$	0,048	0,665	+3,7
117	3 % MgO	$0,242 \pm 0,010$	$6,28 \pm 0,06$	0,039	0,359	–44
118	5 % MgO	$0,235 \pm 0,011$	$6,18 \pm 0,23$	0,038	0,340	–47
134	1 % A237	$0,296 \pm 0,009$	$5,95 \pm 0,19$	0,050	0,733	+14,4
135	1 % A241	$0,296 \pm 0,008$	$6,11 \pm 0,08$	0,049	0,698	+8,9
139	1 % A481	$0,284 \pm 0,009$	$5,94 \pm 0,14$	0,048	0,646	+0,8
142	1 % MgO + 1 % A237	$0,308 \pm 0,008$	$6,29 \pm 0,23$	0,049	0,743	+15,9
143	1 % MgO + 1 % A241	$0,300 \pm 0,009$	$6,26 \pm 0,10$	0,048	0,694	+8,3
144	1 % MgO + 1 % A481	$0,306 \pm 0,007$	$6,24 \pm 0,12$	0,049	0,727	+13,4

Введение 1 мас.% MgO повышает H на 2,5 % и  $H^3/Er^2$  на 3,7 %, что обусловлено формированием армирующего каркаса в эпоксидной матрице [8]. Увеличение концентрации MgO до 3–5 мас.% приводит к падению  $H^3/Er^2$  на 44–47 % вследствие агломерации частиц и возникновения концентраторов напряжений [6, 7]. Микрокапсулы A237 с маслом И-40 обеспечивают максимальный прирост  $H^3/Er^2$  (+14,4 %) среди капсул всех типов. Капсулы встраиваются в эпоксидную матрицу без существенного нарушения её структуры, а полиэфирная оболочка химически совместима со шитой эпоксидной сеткой [13, 17]. Комбинация 1 % MgO + 1 % A237 (образец 142) даёт наибольший прирост  $H^3/Er^2$  – 15,9 %, что свидетельствует о синергетическом влиянии двух наполнителей на физико-механические свойства композита.

Поскольку параметр  $H^3/Er^2$  отражает сопротивление пластической деформации, ожидается его связь с интенсивностью износа, что подтверждается трибологическими испытаниями, рассмотренными далее.

Результаты трибологических испытаний представлены в табл. 4. Испытания выполнены при сухом трении по схеме «вал – палец» (нагрузка 55 Н, путь 2200 м).

Таблица 4

## Трибологические характеристики композитов

Шифр	Состав	Интенсивность изнашивания, мг/м	$\Delta$ износа, %	Коэффициент трения $\mu$
106	ЭД-20 (контроль)	55,2	—	0,40
116	1 % MgO	20,3	-63	0,40
117	3 % MgO	41,8	-24	0,45
118	5 % MgO	42,7	-23	0,37
134	1 % A237	13,9	-75	0,22
135	1 % A241	36,0	-35	0,27
139	1 % A481	31,9	-42	0,24
142	1 % MgO + 1 % A237	10,2	-82	0,23
143	1 % MgO + 1 % A241	29,2	-47	0,27
144	1 % MgO + 1 % A481	20,2	-63	0,26

Чистая смола ЭД-20 (образец 106) характеризуется интенсивностью износа 55,2 мг/м и коэффициентом трения  $\mu = 0,40$ , что соответствует данным литературы [14]. Введение 1 мас.% MgO (образец 116) снижает износ на 63 % (до 20,3 мг/м) при неизменном коэффициенте трения  $\mu = 0,40$ . Повышение содержания MgO до 3–5 мас.% увеличивает износ до 41,8–42,7 мг/м, что коррелирует с падением  $H^3/Er^2$  при высоких концентрациях наполнителя [7]. Коэффициент трения при 3 % MgO возрастает до 0,45, что указывает на абразивное действие агломератов. При 5 % MgO  $\mu$  снижается до 0,37, вероятно, за счёт образования оксидного трибослоя [8, 9].

Микрокапсулы A237 с маслом И-40 (образец 134) наиболее эффективны среди капсул: износ снижается на 75 % (до 13,9 мг/м), а коэффициент трения – с 0,40 до 0,22 (на 45 %). Капсулы A241 и A481 снижают износ на 35 и 42 % соответственно [14]. Масло И-40 обладает оптимальной вязкостью (50–100 мм<sup>2</sup>/с при 40 °С), что обеспечивает формирование стабильной граничной смазочной плёнки в зоне фрикционного контакта [23, 24].

Оптимальный состав – образец 142 (ЭД-20 + 1 % MgO + 1 % A237) – демонстрирует максимальное снижение износа на 82 % (до 10,2 мг/м) при  $\mu = 0,23$  по сравнению с контрольным образцом № 106 (табл. 4). Для количественной оценки синергии выполнен расчёт аддитивности: остаточная доля износа при введении MgO = 37 % и A237 = 25 %, аддитивная доля =  $(37 \% \times 25 \%) / 100 = 9,25 \%$ , прогнозный износ =  $55,2 \times 0,0925 = 5,1$  мг/м. Фактический износ (10,2 мг/м) выше аддитивного прогноза, однако суммарное снижение на 82 % превышает сумму индивидуальных эффектов, что указывает на взаимодействие механизмов структурного армирования и самосмазывания; при этом фактическое значение износа находится между аддитивным прогнозом и эффектами индивидуальных наполнителей, что требует дальнейшего уточнения характера синергии [14].

Параметр пластичности  $H^3/Er^2$  демонстрирует корреляцию с интенсивностью износа (табл. 5). Прирост  $H^3/Er^2$  на 1 % соответствует снижению износа на 1,2 % (в рассматриваемом диапазоне составов и условиях испытаний, исходя из ограниченной выборки данных), что позволяет использовать индентирование в качестве экспресс-метода прогнозирования триботехнических свойств полимерных композиционных материалов.

Таблица 5

Корреляция  $H^3/Er^2$  с интенсивностью износа

Шифр	Состав	$H^3/Er^2, \times 10^{-3}$	Интенсивность износа, мг/м
106	ЭД-20	0,641	55,2
116	1% MgO	0,665	20,3
134	1% A237	0,733	13,9
142	1% MgO + 1% A237	0,743	10,2

Исключение составляет образец 116, для которого снижение износа (63 %) непропорционально малому приросту  $H^3/Er^2$  (3,7 %). Это объясняется дополнительным механизмом – формированием MgO-содержащего трибослоя на поверхности контртела, снижающего интенсивность контакта «полимер – металл».

Дальнейший анализ структуры вторичных слоёв необходим для интерпретации наблюдаемого снижения износа и коэффициента трения, особенно в композиции 142, и выполнен методами СЭМ-ЭДС и ИК-НПВО.

Элементный состав поверхности контртела после испытаний образца 142 исследован методом СЭМ-ЭДС (рис. 1, а). В трибослое идентифицированы элементы: С, О, N, Mg, Fe. Углерод (277 эВ) и азот (392 эВ) указывают на перенос фрагментов эпоксидной матрицы. Магний (1254 эВ) подтверждает миграцию MgO из объёма композита на поверхность контртела. Железо (615 эВ, 703 эВ, 6404 эВ, 7058 эВ.) соответствует подложке стального контртела. Наличие кислорода (526 эВ) может указывать на несколько источников, это могут быть: эпоксидные и гидроксильные группы эпоксидной смолы; эфирные связи полиэфирной оболочки микрокапсул; оксид магния; оксиды железа ( $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ ), образующиеся при трибоокислении стальной поверхности [15].

Кинетика формирования трибослоя исследована методом ИК-НПВО по изменению интенсивности характеристических полос поглощения (табл. 6, рис. 1, б) [21, 22].

Таблица 6

### Отнесение характеристических полос ИК-НПВО спектров поверхности трения

Волновое число, $cm^{-1}$	Основное отнесение	Комментарии
650–900	Деформационные колебания связи N-H	Соответствует аминогруппе C–NH <sub>2</sub> (Отвердитель полиэтиленполиамин (ПЭПА))
827	Симметричное валентное колебание C-O-C оксиранового кольца эпоксидной группы	Указывает на присутствие непрореагировавших эпоксидных групп в трибослое
1025	Валентное колебание C-O-C эфирных связей отверждённой эпоксидной сетки	Стабильная полоса, характерная для полностью отверждённой эпоксидной смолы
1160	Валентное колебание C-OH вторичных спиртов	Продукт окислительной деградации эпоксида под действием температуры и кислорода в зоне трения
1503	Скелетные колебания ароматического кольца (C-C)	Бисфенольный А фрагмент эпоксидной смолы, стабильная полоса
1743	Валентное колебание C=O карбонильных групп	Происхождение: окисленный эпоксид (кетоны, альдегиды) и/или сложные эфиры микрокапсулированного масла. Требуется разделение вкладов
2853	Симметричное валентное колебание CH <sub>2</sub> -групп	Эпоксидная матрица + смазочное масло
2922	Асимметричное валентное колебание CH <sub>2</sub> -групп	Эпоксидная матрица + смазочное масло

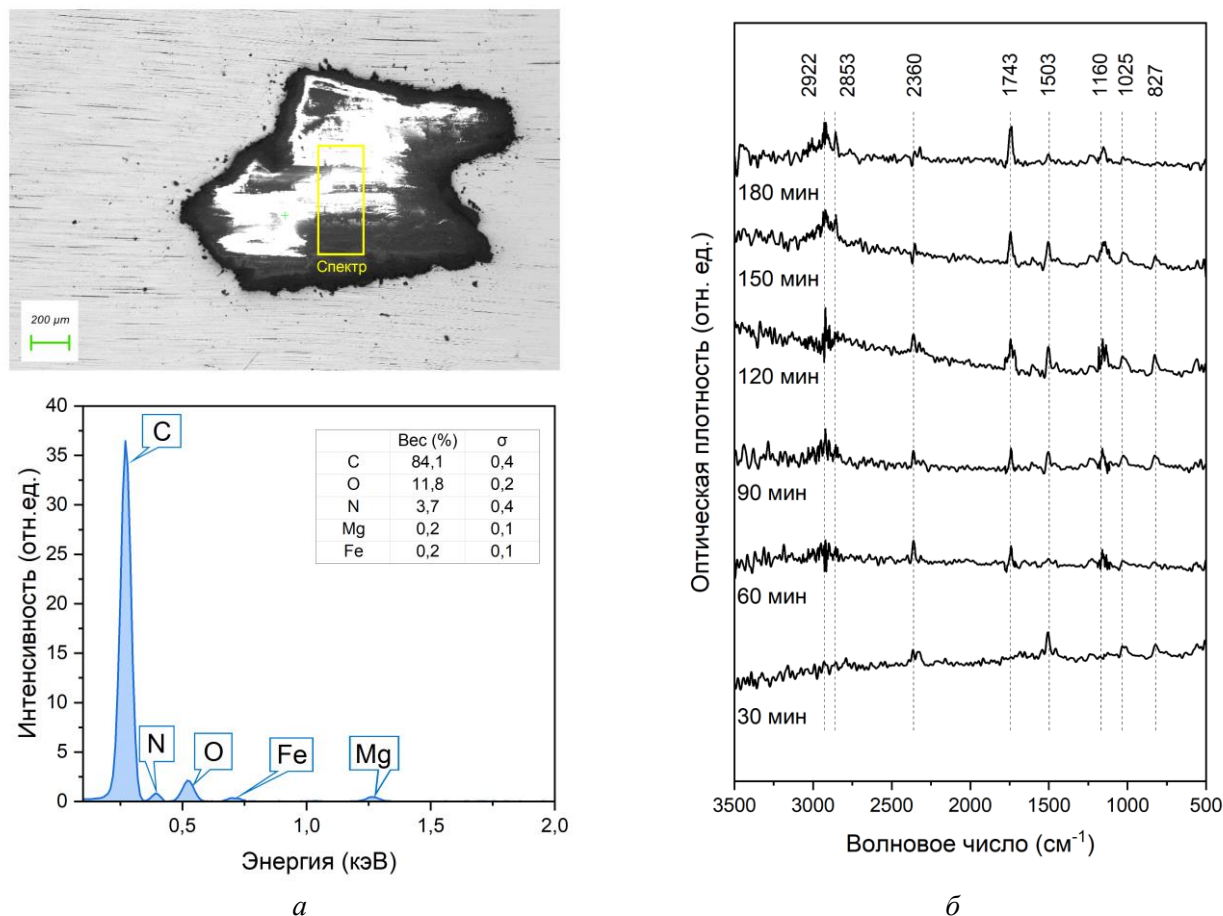
Полученные результаты свидетельствуют о синергетическом эффекте комбинации оксида магния и микрокапсулированных смазочных материалов в эпоксидной матрице. Механизм синергии включает структурные, химические и теплофизические аспекты.

– Частицы MgO размером 20–60 мкм выполняют роль твёрдого каркаса в композите, повышая его несущую способность и препятствуя развитию пластической деформации в зоне трения. Микрокапсулы (5–30 мкм) локализованы между частицами MgO, образуя резервуары смазочного материала, высвобождающегося при разрушении оболочки под действием сдвиговых напряжений. Магнитная ориентация микрокапсул обеспечивает их концентрацию у поверхности трения, повышая эффективность смазывания на начальных стадиях изнашивания.

– MgO способен взаимодействовать с эпоксидными и гидроксильными группами полимерной матрицы, образуя водородные связи и координационные связи Mg–O–C, что повышает степень сшивки и плотность сетки. Высвобождаемое из микрокапсул масло адсорбируется на поверхности частиц MgO, формируя граничные смазочные слои, которые снижают коэффициент трения и препятствуют прямому контакту металла с полимером. Трибохимическое окисление масла и эпоксида в зоне контакта приводит

к образованию полярных продуктов (карбонильные и гидроксильные группы), которые адсорбируются на стальной поверхности, формируя устойчивые трибоплёнки.

– MgO обладает высокой теплопроводностью (порядка 40–60 Вт/(м·К)) по сравнению с эпоксидной матрицей (0,2–0,3 Вт/(м·К)), что способствует отводу тепла из зоны трения и снижению температурных пиков, уменьшающих термическую деструкцию полимера и окисление масла.



**Рис. 1. Исследование вторичных структур методами спектроскопии:**

*а* – элементный состав вторичных структур в зоне дорожки трения;

*б* – ИК-спектры вторичных структур с поверхности контртела

Модель композитного трибослоя предполагает формирование вторичных структур циклически в три стадии (рис. 2):

**1 Начальная стадия (0–30 мин).** Преобладает перенос эпоксидной матрицы – в спектре нарастают полосы 827, 1025, 1503 см<sup>-1</sup>. Частицы MgO внедряются в формирующийся трибослой, выполняя роль структурного каркаса.

**2 Стадия маслоотделения (30–60 мин).** Разрушение оболочек микрокапсул приводит к высвобождению масла И-40. В спектре появляются полосы 1160, 1743, 2853, 2922 см<sup>-1</sup>. MgO удерживает масло на поверхности за счёт высокой поверхностной энергии, усиливая смазочный эффект.

**3 Стационарная стадия (> 60 мин).** Устанавливается динамическое равновесие образования и разрушения трибоплёнки. Интенсивность масляных полос (1743 см<sup>-1</sup>) колеблется с периодом 10–20 мин, что подтверждает циклический механизм. Коэффициент трения стабилизируется на уровне  $\mu = 0,23$ .

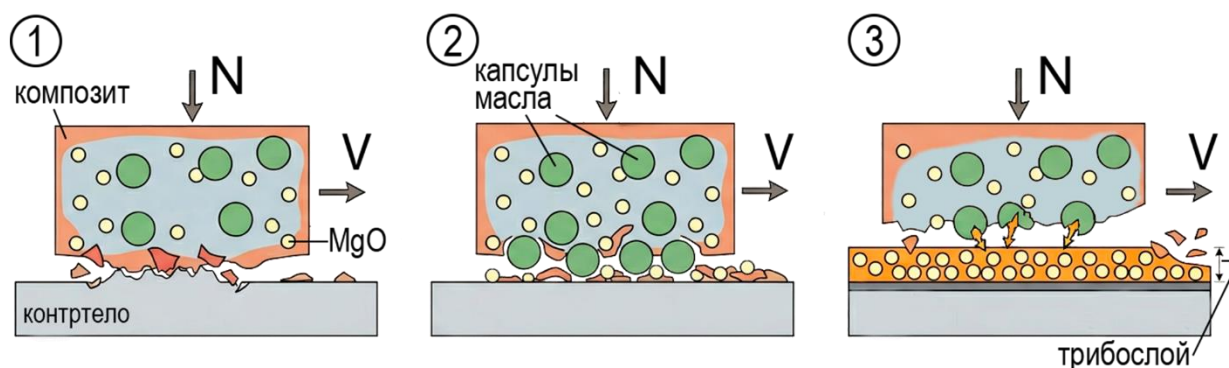


Рис. 2. Схема кинетики формирования трибослоя

Полученные результаты согласуются с исследованиями других авторов. В работе [25] показано, что введение оксидных наполнителей в эпоксидные композиты снижает износ на 40–60 %, что близко к нашим результатам для 1 % MgO (63 %). В работе [26] сообщается о снижении коэффициента трения до 0,20–0,25 при введении микрокапсулированных смазок в полимерные матрицы, что согласуется с нашими данными ( $\mu = 0,22–0,23$  для композитов с микрокапсулами A237).

Разработанные композиты могут применяться в подшипниках скольжения, направляющих элементах, антифрикционных покрытиях скользящих и боковых опор. Снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания на 82 % обеспечивает увеличение срока службы узлов трения в 5–6 раз по сравнению с чистыми эпоксидными композитами, что критично для повышения надёжности и снижения эксплуатационных затрат на обслуживание техники.

### Выводы

1 Разработан трёхкомпонентный композит на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с частицами MgO и полиэфирными микрокапсулами, содержащими смазочное масло. Оптимальный состав (ЭД-20 + 1 мас.% MgO + 1 мас.% микрокапсул A237 с маслом И-40) обеспечивает снижение интенсивности износа на 82 % (с 55,2 до 10,2 мг/м) и коэффициента трения с 0,40 до 0,23 по сравнению с чистой эпоксидной матрицей.

2 Установлено, что совместное введение 1 мас.% MgO и 1 мас.% микрокапсул A237 повышает параметр пластичности  $H^3/Er^2$  на 15,9 % (с 0,641 до  $0,743 \times 10^{-3}$ ), что превышает суммарный эффект индивидуальных добавок и свидетельствует о синергетическом взаимодействии наполнителей.

3 Выявлена количественная корреляция параметра сопротивления пластической деформации  $H^3/Er^2$  с износостойкостью эпоксидных композитов: прирост  $H^3/Er^2$  на 1 % соответствует снижению интенсивности изнашивания на 1,2 %, что подтверждает прогностическую ценность этого параметра для оценки трибологических характеристик.

4 Методами ИК-НПВО спектроскопии и СЭМ-ЭДС выявлен трёхстадийный циклический механизм формирования композитного трибослоя на поверхности контртела: (1) перенос эпоксидной матрицы и внедрение частиц MgO (0–30 мин); (2) высвобождение смазочного масла из разрушенных микрокапсул и стабилизация масляной плёнки частицами MgO (30–60 мин); (3) стационарный режим с динамическим равновесием образования и разрушения трибоплёнки (> 60 мин).

Показано, что частицы MgO выполняют двойную функцию в трибологической системе: структурное армирование эпоксидной матрицы (повышение  $H$  на 2,5 %) и удержание смазочного материала на поверхности контртела за счёт высокой поверхностной энергии, что обеспечивает стабильность граничного смазывания.

### Список литературы

- Friedrich, K.** Polymer composites for tribological applications / K. Friedrich // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. – 2018. – Vol. 1, No. 1. – P. 3–39.
- Myshkin, N. K.** Tribology of polymers : Adhesion, friction, wear, and mass-transfer / N. K. Myshkin, M. I. Petrokovets, A. V. Kovalev // *Tribology International*. – 2005. – Vol. 38, No. 11–12. – P. 910–921. – DOI 10.1016/j.triboint.2005.07.016.

### References

- Friedrich, K.** Polymer composites for tribological applications / K. Friedrich // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. – 2018. – Vol. 1, No. 1. – P. 3–39.
- Myshkin, N. K.** Tribology of polymers : Adhesion, friction, wear, and mass-transfer / N. K. Myshkin, M. I. Petrokovets, A. V. Kovalev // *Tribology International*. – 2005. – Vol. 38, No. 11–12. – P. 910–921. – DOI 10.1016/j.triboint.2005.07.016.

- 3 **Holmberg, K.** Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions / K. Holmberg, A. Erdemir // *Friction*. – 2017. – Vol. 5, No. 3. – P. 263–284. – DOI 10.1007/s40544-017-0183-5.
- 4 **May, C. A.** *Epoxy Resins: Chemistry and Technology* / C. A. May. – 2nd ed. – New York : Marcel Dekker, 1988. – 1288 p. – DOI 10.1201/9780203756713.
- 5 **Ellis, B.** *Chemistry and Technology of Epoxy Resins* / B. Ellis. – London : Blackie Academic & Professional, 1993. – 337 p.
- 6 **Mohan, P.** A critical review: The modification, properties, and applications of epoxy resins / P. Mohan // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. – 2013. – Vol. 52, № 2. – P. 107–125. – DOI 10.1080/03602559.2012.727057.
- 7 Epoxy nanocomposites – fracture and toughening mechanisms / B. Wetzell, P. Rosso, F. Hauptert, K. Friedrich // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2006. – Vol. 73, No. 16. – P. 2375–2398. – DOI 10.1016/j.engfracmech.2006.05.018.
- 8 Three-body abrasive wear behaviour of carbon and glass fiber reinforced epoxy composites / B. Suresha, G. Chandramohan, M. Siddaramaiah [et al.] // *Materials Science and Engineering : A*. – 2007. – Vol. 443(1–2). – P. 285–291. – DOI 10.1016/j.msea.2006.09.016.
- 9 Tribological properties of short carbon fibers reinforced epoxy composites / N. W. Khun, H. Zhang, L. H. Lim [et al.] // *Friction*. – 2014. – Vol. 2. – P. 226–239. – DOI 10.1007/s40544-014-0043-5.
- 10 Wear and friction performance of PTFE filled epoxy composites with a high concentration of SiO<sub>2</sub> particles / J. T. Shen, M. Top, Y. T. Pei [et al.] // *Wear*. – 2015. – Vol. 322–323. – P. 171–180. – DOI 10.1016/j.wear.2014.11.015.
- 11 Autonomic healing of polymer composites / S. R. White, N. R. Sottos, P. H. Geubelle [et al.] // *Nature*. – 2001. – Vol. 409. – P. 794–797. – DOI 10.1038/35057232.
- 12 Preparation and tribological properties of surface-modified calcium borate nanoparticles as additive in lubricating oil / G. Huang, W. Yu, Q. Cai [et al.] // *Colloids and Surfaces A*. – 2007. – Vol. 296, No. 1–3. – P. 60–63. – DOI 10.1108/ILT-10-2011-0074.
- 13 Microencapsulation of isocyanates for self-healing polymers / J. Yang, M. W. Keller, J. S. Moore [et al.] // *Macromolecules*. – 2008. – Vol. 41, No. 24. – P. 9650–9655. – DOI 10.1021/ma801718v.
- 14 Microcapsule-based self-healing and self-lubricating fiber-reinforced polymer composites / Q. Li, A. K. Mishra, N. H. Kim [et al.] // *Composites Part B*. – 2017. – Vol. 135. – P. 1–10. – DOI 10.1016/j.compositesb.2017.07.018.
- 3 **Holmberg, K.** Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions / K. Holmberg, A. Erdemir // *Friction*. – 2017. – Vol. 5, No. 3. – P. 263–284. – DOI 10.1007/s40544-017-0183-5.
- 4 **May, C. A.** *Epoxy Resins: Chemistry and Technology* / C. A. May. – 2nd ed. – New York : Marcel Dekker, 1988. – 1288 p. – DOI 10.1201/9780203756713.
- 5 **Ellis, B.** *Chemistry and Technology of Epoxy Resins* / B. Ellis. – London : Blackie Academic & Professional, 1993. – 337 p.
- 6 **Mohan, P.** A critical review: The modification, properties, and applications of epoxy resins / P. Mohan // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. – 2013. – Vol. 52, № 2. – P. 107–125. – DOI 10.1080/03602559.2012.727057.
- 7 Epoxy nanocomposites – fracture and toughening mechanisms / B. Wetzell, P. Rosso, F. Hauptert, K. Friedrich // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2006. – Vol. 73, No. 16. – P. 2375–2398. – DOI 10.1016/j.engfracmech.2006.05.018.
- 8 Three-body abrasive wear behaviour of carbon and glass fiber reinforced epoxy composites / B. Suresha, G. Chandramohan, M. Siddaramaiah [et al.] // *Materials Science and Engineering : A*. – 2007. – Vol. 443(1–2). – P. 285–291. – DOI 10.1016/j.msea.2006.09.016.
- 9 Tribological properties of short carbon fibers reinforced epoxy composites / N. W. Khun, H. Zhang, L. H. Lim [et al.] // *Friction*. – 2014. – Vol. 2. – P. 226–239. – DOI 10.1007/s40544-014-0043-5.
- 10 Wear and friction performance of PTFE filled epoxy composites with a high concentration of SiO<sub>2</sub> particles / J. T. Shen, M. Top, Y. T. Pei [et al.] // *Wear*. – 2015. – Vol. 322–323. – P. 171–180. – DOI 10.1016/j.wear.2014.11.015.
- 11 Autonomic healing of polymer composites / S. R. White, N. R. Sottos, P. H. Geubelle [et al.] // *Nature*. – 2001. – Vol. 409. – P. 794–797. – DOI 10.1038/35057232.
- 12 Preparation and tribological properties of surface-modified calcium borate nanoparticles as additive in lubricating oil / G. Huang, W. Yu, Q. Cai [et al.] // *Colloids and Surfaces A*. – 2007. – Vol. 296, No. 1–3. – P. 60–63. – DOI 10.1108/ILT-10-2011-0074.
- 13 Microencapsulation of isocyanates for self-healing polymers / J. Yang, M. W. Keller, J. S. Moore [et al.] // *Macromolecules*. – 2008. – Vol. 41, No. 24. – P. 9650–9655. – DOI 10.1021/ma801718v.
- 14 Microcapsule-based self-healing and self-lubricating fiber-reinforced polymer composites / Q. Li, A. K. Mishra, N. H. Kim [et al.] // *Composites Part B*. – 2017. – Vol. 135. – P. 1–10. – DOI 10.1016/j.compositesb.2017.07.018.

- В : Engineering. – 2014. – Vol. 57. – P. 51–59. – DOI 10.1016/B978-1-78242-280-8.00004-2.
- 15 **Горячева, И. Г.** Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева – Москва : Наука, 2001. – 478 с. – ISBN 5-02-002567-4.
- 16 **Гаркунов, Д. Н.** Триботехника (износ и безызносность) / Д. Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : МСХА, 2001. – 616 с. – ISBN 5-94327-004-3.
- 17 **Blaiszik, B. J.** Microcapsules filled with reactive solutions for self-healing materials / B. J. Blaiszik, N. R. Sottos, S. R. White // Polymer. – 2008. – Vol. 49, No. 18. – P. 3942–3949. – DOI 10.1016/j.polymer.2008.12.040.
- 18 **Oliver, W. C.** An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // Journal of Materials Research. – 1992. – Vol. 7, No. 6. – P. 1564–1583. DOI 10.1557/JMR.1992.1564.
- 19 **Belyak, O. A.** Identification of viscoelastic properties of epoxy composites with magnesium oxide and boron carbide additives / O. A. Belyak, T. V. Suvorova, D. S. Manturov, A. M. Ananko // Mechanics of Composite Materials. – 2025. – Vol. 61, No. 2. – P. 257–268. – DOI 10.1007/s11029-025-10274-x.
- 20 **Pharr, G. M.** Critical issues in making small-depth mechanical property measurements by nanoindentation with continuous stiffness measurement / G. M. Pharr, J. H. Strader, W. C. Oliver // Journal of Materials Research. – 2009. – Vol. 24, No. 3. – P. 653–666. – DOI 10.1557/jmr.2009.0096.
- 21 **Smith, B. C.** Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy / B. C. Smith. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2011. – 207 p. – DOI 10.1201/b10777.
- 22 **Stuart, B.** Infrared Spectroscopy : Fundamentals and Applications / B. Stuart. – Chichester : John Wiley & Sons, 2004. – 248 p. – ISBNs 0-470-85427-8 (HB); 0-470-85428-6 (PB).
- 23 **Archard, J. F.** The temperature of rubbing surfaces / J. F. Archard // Wear. – 1958–1959. – Vol. 2, No. 6. – P. 438–455.
- 24 **Bowden, F. P.** The Friction and Lubrication of Solids / F. P. Bowden, D. Tabor. – Oxford : Clarendon Press, 1950. – 337 p.
- 25 **Chang, L.** Tribological properties of epoxy nanocomposites : Part I. Enhancement of the wear resistance by nano-TiO<sub>2</sub> particles / L. Chang, Z. Zhang // Wear. – 2006. – Vol. 260, No. 7–8. – P. 869–878. – DOI 10.1016/j.wear.2005.04.021.
- Q. Li, A. K. Mishra, N. H. Kim [et al.] // Composites Part B : Engineering. – 2014. – Vol. 57. – P. 51–59. – DOI 10.1016/B978-1-78242-280-8.00004-2.
- 15 **Goryacheva, I. G.** Mechanics of friction interaction / I. G. Goryacheva – Moscow : Nauka, 2001. – 478 p. – ISBN 5-02-002567-4.
- 16 **Garkunov, D. N.** Tribotechnics (Wear and Anti-Wear) / D. N. Garkunov. – 4th ed., revised and expanded. – Moscow : Moscow Agricultural Academy, 2001. – 616 p. – ISBN 5-94327-004-3.
- 17 **Blaiszik, B. J.** Microcapsules filled with reactive solutions for self-healing materials / B. J. Blaiszik, N. R. Sottos, S. R. White // Polymer. – 2008. – Vol. 49, No. 18. – P. 3942–3949. – DOI 10.1016/j.polymer.2008.12.040.
- 18 **Oliver, W. C.** An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // Journal of Materials Research. – 1992. – Vol. 7, No. 6. – P. 1564–1583. – DOI 10.1557/JMR.1992.1564.
- 19 **Belyak, O. A.** Identification of viscoelastic properties of epoxy composites with magnesium oxide and boron carbide additives / O. A. Belyak, T. V. Suvorova, D. S. Manturov, A. M. Ananko // Mechanics of Composite Materials. – 2025. – Vol. 61, No. 2. – P. 257–268. – DOI 10.1007/s11029-025-10274-x.
- 20 **Pharr, G. M.** Critical issues in making small-depth mechanical property measurements by nanoindentation with continuous stiffness measurement / G. M. Pharr, J. H. Strader, W. C. Oliver // Journal of Materials Research. – 2009. – Vol. 24, No. 3. – P. 653–666. – DOI 10.1557/jmr.2009.0096.
- 21 **Smith, B. C.** Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy / B. C. Smith. – 2<sup>nd</sup> ed. – Boca Raton : CRC Press, 2011. – 207 p. – DOI 10.1201/b10777.
- 22 **Stuart, B.** Infrared Spectroscopy : Fundamentals and Applications / B. Stuart. – Chichester : John Wiley & Sons, 2004. – 248 p. – ISBNs 0-470-85427-8 (HB); 0-470-85428-6 (PB).
- 23 **Archard, J. F.** The temperature of rubbing surfaces / J. F. Archard // Wear. – 1958–1959. – Vol. 2, No. 6. – P. 438–455.
- 24 **Bowden, F. P.** The Friction and Lubrication of Solids / F. P. Bowden, D. Tabor. – Oxford : Clarendon Press, 1950. – 337 p.
- 25 **Chang, L.** Tribological properties of epoxy nanocomposites : Part I. Enhancement of the wear resistance by nano-TiO<sub>2</sub> particles / L. Chang, Z. Zhang // Wear. – 2006. – Vol. 260, No. 7–8. – P. 869–878. – DOI 10.1016/j.wear.2005.04.021.

26 **Samyn, P.** Friction and wear mechanisms of sintered and thermoplastic polyimides under adhesive sliding / P. Samyn, G. Schoukens, F. Verpoort, J. Craenenbroeck, P. de baets // *Macromolecular Materials and Engineering*. – 2007. – Vol. 292, No. 5. – P. 523–556. – DOI 10.1002/mame.200600400.

26 **Samyn, P.** Friction and wear mechanisms of sintered and thermoplastic polyimides under adhesive sliding / P. Samyn, G. Schoukens, F. Verpoort, J. Craenenbroeck, P. de baets // *Macromolecular Materials and Engineering*. – 2007. – Vol. 292, No. 5. – P. 523–556. – DOI 10.1002/mame.200600400.

*A. M. Ananko*

## ENHANCEMENT OF WEAR RESISTANCE OF EPOXY COMPOSITES BY INTRODUCTION OF MICROENCAPSULATED LUBRICANTS AND MAGNESIUM OXIDE PARTICLES

**Abstract.** The wear of polymer materials in friction units of transport equipment determines the service life and reliability of rolling stock. The aim of the work is to improve the wear resistance of epoxy composites based on ED-20 resin by introducing magnesium oxide (MgO) particles and polyester capsules with lubricating filler. Microcapsules with a size of 5–30  $\mu\text{m}$  were synthesized by interfacial polycondensation of sebacoyl chloride with polyhydric alcohols. The physical and mechanical properties were determined by indentation (NanoTest 600), tribological characteristics were measured on the II-5018 friction machine according to the "shaft-pin" scheme at a load of 55 N and a friction path of 2200 m. The optimal composition was established – ED-20 + 1 wt.% MgO + 1 wt.% microcapsules A237 (I-40 oil), providing a reduction in wear intensity by 82 % (from 55.2 to 10.2 mg/m) and a friction coefficient from 0.40 to 0.23. The plasticity parameter  $H^3/Er^2$  increased by 15.9 %. The cyclic mechanism of formation of a composite tribolayer from MgO particles, fragments of the epoxy matrix and lubricating oil was revealed by ATR-FTIR and SEM-EDS methods. The results are applicable for the development of self-lubricating polymer materials for friction units of rail transport.

**Keywords:** epoxy composites, tribology, wear resistance, microcapsules, magnesium oxide, self-lubricating materials, secondary structures, dry friction, indentation, polymer composite materials.

**For citation:** Ananko, A. M. Enhancement of wear resistance of epoxy composites by introduction of microencapsulated lubricants and magnesium oxide particles / A. M. Ananko // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*. – 2026. – No. 1. – P. 151–160. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_151.

### Сведения об авторах

**Ананко Анатолий Михайлович**  
Ростовский государственный университет  
путей сообщения (РГУПС),  
лаборатория функциональных покрытий,  
научно-испытательный центр  
«Нанотехнологии и трибосистемы» НИЧ,  
младший научный сотрудник,  
e-mail: nypotilitailla@mail.ru

### Information about the authors

**Ananko Anatoly Mikhailovich**  
Rostov State Transport University (RSTU),  
Laboratory of Functional Coatings,  
Research and Testing Center  
“Nanotechnologies and Tribosystems”,  
Research Department Junior Researcher,  
e-mail: nypotilitailla@mail.ru

*Б. Г. Гасанов, Е. В. Харченко, Г. Г. Панчвидзе*

## ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКОВЫХ ЖЕЛЕЗОМЕДНОГРАФИТОВЫХ СПЛАВОВ

**Аннотация.** Рассмотрено влияние химического состава смазочных материалов, содержащих поверхностно-активные вещества (ПАВ), на значения коэффициента трения, температуры и линейного износа образцов из порошковых антифрикционных сплавов на основе железа.

Проведенные изыскания показали, что насыщение пористых структур, изготовленных из Fe, Fe + Cu и Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr, смазочными составами на основе карбоновых кислот или иных ПАВ с последующим их применением в области контакта трущихся элементов заметно улучшает трибологические характеристики исследуемых порошковых материалов.

В результате экспериментов установлено, что использование смеси минерального масла И-20А и спиртового раствора олеиновой кислоты в качестве смазки приводит к значительному, примерно в 4–6 раз, сокращению периода приработки образцов. Также наблюдается снижение коэффициента трения, который в стабильном режиме не превышает значений 0,01–0,007, после чего система практически переходит в режим работы с минимальным износом.

С помощью метода электронно-зондового микроанализа определены закономерности образования промежуточных слоев, улучшающих триботехнические свойства порошковых материалов на основе железо – медь – графит, а также влияние и состав смазочных материалов, содержащих ПАВ, на микроструктуру поверхностного слоя пар трения.

**Ключевые слова:** порошковые антифрикционные материалы, промежуточные структуры, триботехнические свойства, поверхностно-активные вещества, самоорганизующиеся системы.

**Для цитирования:** Гасанов, Б. Г. Повышение трибологических характеристик порошковых железомеднографитовых сплавов / Б. Г. Гасанов, Е. В. Харченко, Г. Г. Панчвидзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 161–175. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_161.

### **Введение**

Современные тенденции в трибоматериаловедении ориентированы на создание новых материалов и инновационных технологий, позволяющих существенно улучшать трибологические характеристики пар трения с целью значительного снижения коэффициента трения, линейного износа и времени приработки поверхностей трущихся пар.

Данный подход отличается от уже известных [1–3] влиянием характеристик материала поверхностей трущихся пар и смазочной среды на способность их взаимодействия в процессе трения и формирования за счет трибосинтеза промежуточных наноструктур, влияющих на трибологические характеристики.

Установлено, что присутствие ПАВ в зоне трения стимулирует селективное анодное растворение определенных элементов, входящих в состав антифрикционных медных сплавов [4–7]. Ключевым фактором является активация направленного переноса массы на контактирующих поверхностях, приводящего к формированию защитных сервовитных слоев и серфинг-пленок [8, 9]. В результате этого процесса атомы активных компонентов переходят в смазку, а в приповерхностном слое медных антифрикционных сплавов происходит обогащение пористыми микровключениями меди [10, 11]. Следовательно, при наличии ПАВ в смазочной среде наночастицы меди активно взаимодействуют с поверхностью контртела, формируя тонкий сервослой, что способствует созданию самоорганизующихся узлов трения [11–13].

В машиностроении широко применяются триботехнические железомеднографитовые материалы, содержащие 1–2 % Cu и 1–1,5 % Gr и отличающиеся высокими механическими свойствами [14]. Исследования показали, что в конструкционных спеченных сталях медь улучшает прессуемость шихты, способствует интенсификации спекания благодаря образованию жидкой фазы и повышает твердость и прочность при совместном добавлении меди и графита [15]. Следует также отметить, что медь не формирует карбиды и поэтому обеспечивает упрочнение феррита, как следствие, эффективность ее влияния на механические свойства сталей возрастает при низких уровнях содержания углерода.

Несмотря на то что спеченные композиты на основе Fe–Gr, Cu–Gr и Fe–Cu–Gr широко применяются в различных отраслях как антифрикционные материалы, физическая природа механизма трибосинтеза наноструктур в узлах трения при их пропитке индустриальными маслами с добавками поверхностно-активных веществ не изучена.

До сих пор мало изучено, как химический состав смазочных материалов с ПАВ, состав компонентов и параметры термической обработки порошковых сплавов Fe–Cu–Gr влияют на трибологические свойства при трении.

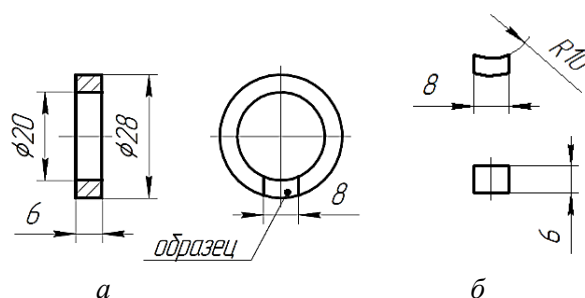
В рамках данной работы предполагается изучение трибологических характеристик и создания новых подходов к формированию самоорганизующихся узлов трения на основе системы Fe – Cu - Gr с использованием смазочных композиций, содержащих ПАВ.

### **Материалы и методика исследований**

Трибологические исследования проводили на машине трения собственного производства [17, 18] по схеме «вал – колодка». Для исследований использовались кольцевые заготовки (рис. 1, а), которые получали холодным прессованием из порошковой шихты, содержащей (мас) 1,5–2 % графита (ГЛ-1, ГОСТ 5279–74, ГИИ-А ТУ 1916-109-71-2009), 0–5 % меди (ПМС-1, ГОСТ 4960–2017) и остальное порошок железа ПЖВ 2.200.26 или ПЖРВ 2.200.26 (ГОСТ 9849–86). Заготовки в форме колец подвергались спеканию при температуре 1150 °С в течение двух часов в атмосфере диссоциированного аммиака. После завершения процесса спекания их пористость определялась с использованием гидростатического метода в соответствии с ГОСТ 18898–89.

При испытаниях в качестве контртела применялся ролик, изготовленный из стали 40Х или 45 с поверхностной твердостью HRC в диапазоне 45–58 единиц. Внешний диаметр ролика составляет 20 мм, а шероховатость его рабочей поверхности после шлифовки – в пределах Ra = 1,6–0,8 мкм.

Из спеченных колец с применением специального кондуктора вырезались образцы в виде сегментов, имеющих размеры 6 мм в ширину и 8 мм в длину, с параллельными боковыми сторонами, по типу тормозной колодки (рис. 1, б). В каждом сегменте просверливалось глухое отверстие диаметром 2 мм и глубиной 4 мм для размещения термомпары.



**Рис. 1. Образец для испытаний, геометрические размеры**

Перед испытанием часть образцов пропитывали минеральным маслом И-20А (ГОСТ 20799–2022) при 90–100 °С в течение 30–180 мин, часть смесью масла И-20А и глицерина (ГОСТ 6824–96) и часть смесью масла И-20А и спиртовыми растворами некоторых карбоновых кислот в различном процентном соотношении или в чистом виде, а также и их смесью. Перед испытанием все образцы смазывали дополнительно из-за относительно малых размеров рабочей поверхности колодки по сравнению с поверхностью ролика. В отдельных случаях смазочные материалы подавали в зону трения с частотой одна капля через каждые 10–20 с посредством установки капельницы на машину трения. Величину прилагаемой силы подбирали таким образом, чтобы давление в области контакта изменялось от 5 до 25 МПа, а скорость скольжения изменяли в пределах 0,5–1,5 м/с.

Ввиду того, что адгезивные характеристики железных порошков и производных от них веществ обусловлены величиной их площади поверхности, ее параметры измерялись с помощью метода БЭТ на анализаторе адсорбции Micromeritics ChemiSorb 2750.

Для изучения микроструктуры поверхностей, подвергнутых трению, применялись металлографический микроскоп Altami MET-1M и сканирующий электронный микроскоп Quanta 200.

Микрорентгеноспектральный анализ был выполнен в центре коллективного пользования ЮРГПУ (НПИ) с использованием оборудования LScanVer-1100 и Tescan VEGA II LMU, оснащенного системой микроанализа энергодисперсионного типа INCA ENERGY 450/XT производства OXFORD Instruments Analytical.

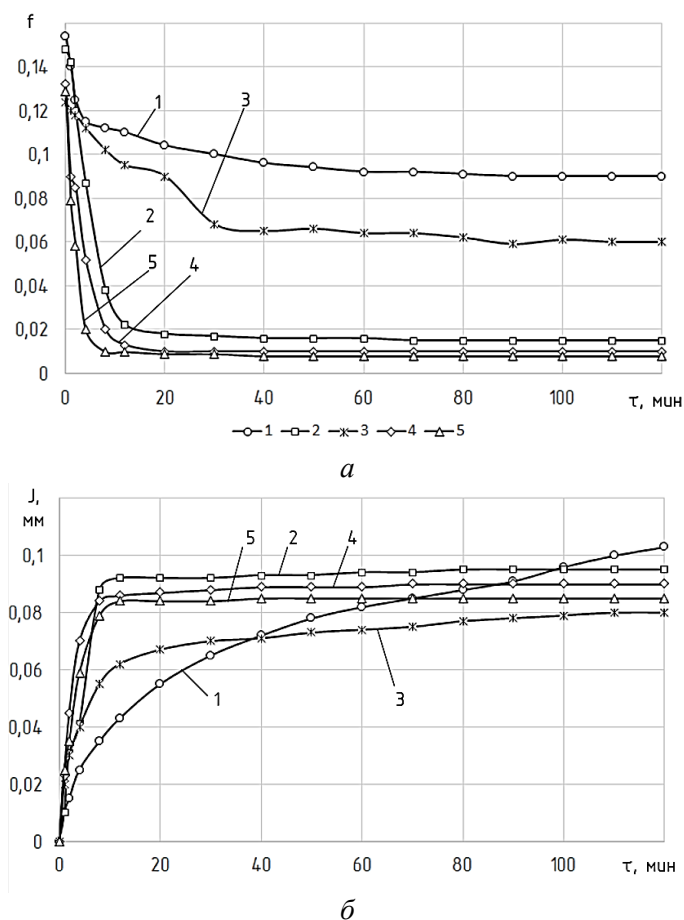
### Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментальные исследования показали, что для образцов из спеченного железа с пористостью 16–22 %, пропитанных маслом И-20А, при нагрузке в 500 Н и скорости скольжения 0,5 м/с, наблюдалось уменьшение коэффициента трения ( $f$ ) с 0,14 до 0,09 в процессе приработки (рис. 2, а, кривая 1). В то же время износ данных образцов постепенно увеличивался во время испытания, достигнув значения 0,1–0,12 мм после 2 ч работы (рис. 2, б, кривая 1).

При использовании порошка железа, пропитанного смесью масла и глицерина в пропорции 80:20, коэффициент трения снижался значительно сильнее с 0,14 до 0,02–0,015 (см. рис. 2, а, кривая 2). Время приработки при этом было небольшим, не более 8–10 мин. Износ после 2 ч испытаний составил 0,092–0,095 мм (см. рис. 2, б, кривая 2).

Спеченные образцы, изготовленные из шихты с добавлением порошков меди, бронзы и графита, пропитывались смесью масла И-20А и глицерина (20 % по объему). В частности, при добавлении 2 % порошка меди в шихту коэффициент трения стабилизировался в течение получаса (см. рис. 2, а, кривая 3). Износ после двухчасового испытания составил 0,07–0,09 мм (см. рис. 2, б, кривая 3). Время приработки и коэффициент трения спеченных образцов из смеси Fe + 2 % БрОЦС 5-5-5 значительно меньше, чем у образцов из смеси Fe + 2 % Cu (рис. 2, кривая 4). При установившемся режиме трения износ образцов из сплавов Fe + 2 % Cu и Fe + 2 % БрОЦС 5-5, пропитанных смесью глицерина и минерального масла, практически не увеличивался, т.е. реализуется безызнасный режим трения.

При исследовании сплавов Fe с добавлением 2,5 % Cu и 2,0 % Gr в идентичных условиях коэффициент трения  $f$  уменьшается с отметки 0,129 до значений в диапазоне 0,006–0,008 (см. рис. 2, а, линия 5). При этом величина линейного износа на начальном этапе приработки не превышала 0,08–0,085 мм (см. рис. 2, б, линия 5).

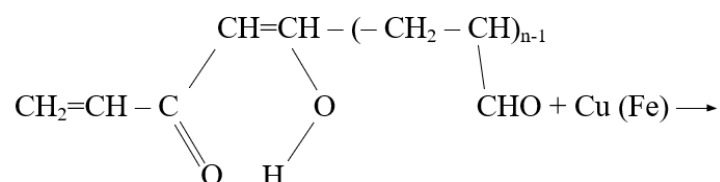


**Рис. 2. Зависимости коэффициента трения (а) и линейного износа (б) от времени испытания спеченных образцов:**

1 – Fe (смазка И-20А); 2 – Fe (смазка И-20А + 20 % глицерина); 3 – Fe + 2 % Cu;  
4 – Fe + 2 % БрОЦС 5-5-5; 5 – Fe + 2 % Cu + 2 % Gr

Результаты исследования показывают значительное уменьшение времени приработки металло-керамики на основе железных порошков с добавлением бронзы или меди, эксплуатируемых в глицериновой среде. Длительность этого этапа снижается в 5–10 раз по сравнению с компактными образцами из стали и медных сплавов при граничном смазывании. Более того, скорость снижения момента трения в процессе приработки у спеченных материалов превосходит аналогичный показатель для сплошных стальных и медных материалов в 15–30 раз. Причину большой разницы во времени приработки спеченных антифрикционных материалов на основе железа в случае добавления в смазочный материал глицерина или других ПАВ можно объяснить более высокой интенсивностью формирования промежуточных структур вследствие большей площади реакционной поверхности и активации физико-химических процессов, возникающих в процессе трения.

В самом начале процесса трения глицерин, подвергаясь трибоактивации, начинает активно окисляться. Этот процесс может привести к образованию альдегидов, в частности акролеина. Впоследствии в области фрикционного контакта эти альдегиды также могут подвергаться окислению и включаться в реакции трибополимеризации с образованием веществ, способных вступать в процессы формирования металлосодержащих соединений [3, 10]. Примерами таких соединений являются комплексы, содержащие двухвалентную медь или железо, образование которых происходит по схеме



Характеристики удельной поверхности трения образцов из спеченных порошковых материалов определяются такими факторами, как форма частиц (морфология), химический состав распределения размеров частиц (гранулометрический состав) исходных порошков металлов и шихты на их основе (рис. 3, *а, в*), режимы и схемы прессования, поверхностная пористость образцов (рис. 3, *б*), распределение компонентов в шихте и материале (рис. 3, *в, з*), механизм массопереноса в процессе трения и др.

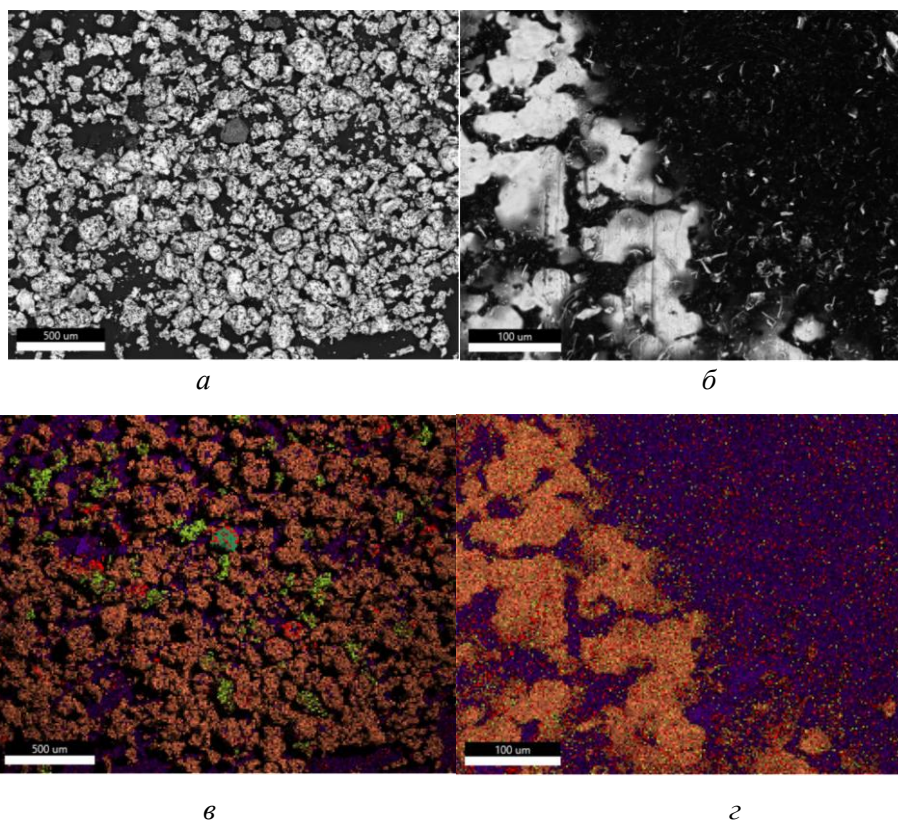


Рис. 3. Морфология частиц (*а*), микроструктура (*б*) и распределение компонентов в смеси (*в*) и на поверхности (*з*) спеченного образца из сплава Fe + 2 % Cu + 2 % Gr

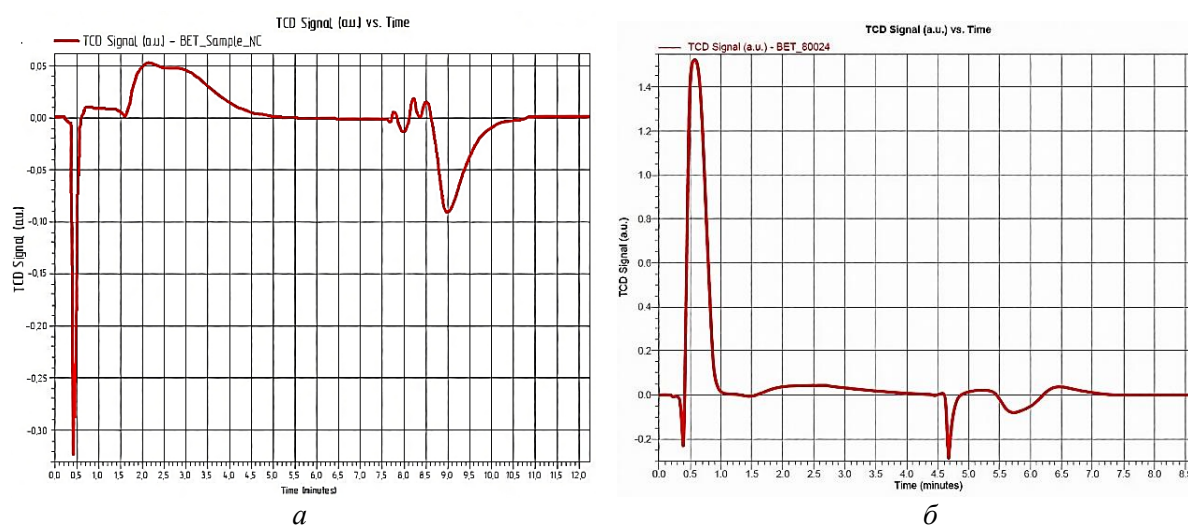
В табл. 1 представлены данные об удельной поверхности порошков железа, полученные с помощью метода БЭТ на основе анализа теплопроводности (рис. 4).

Таблица 1

### Значение удельной поверхности для порошков железа

Марка порошка железа	Удельная поверхность $S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г
ПЖВ 2.200.26 (состояние поставки)	1,3472
ПЖРВ 2. 200.26 (состояние поставки)	0,7574
ПЖРВ 2.200. 26, фракция + 100 – 160	0,1394

У восстановленного порошка железа ПЖВ 2.00.26 она составила 1,3472 м<sup>2</sup>/г, а у распыленного порошка железа ПЖРВ 2.200.26 (фракция + 160 – 100) – 0,1394 м<sup>2</sup>/г. У спеченной прессовки порошка ПЖРВ 2.200.26 с остаточной пористостью 21 % удельная поверхность порошка, определенная методом БЭТ, не превышает 0,0429 м<sup>2</sup>/г.



**Рис. 4. Сигнал теплопроводности порошков железа:**  
 а – ПЖВ 2.200.26; б – ПЖРВ 2.200.26 (фракция + 100 – 160)

Более высокая удельная поверхность порошка железа, полученного восстановлением из оксидов железа, обусловлена развитой поверхностью по сравнению с распыленными порошками, у которых значительная часть частиц имеет сферическую конфигурацию (см. рис. 3, в).

Допускаем, что глубина расчетного слоя пропитки спеченных образцов составляет около 0,1 и более (см. рис. 3, б и з), а площадь реакционной поверхности частиц у спеченных образцов пористостью 18–23 % из порошка ПЖРВ 2.200.26 пропорциональна величине  $(1 - \alpha_k)$  [19, 20], тогда реакционную поверхность слоя спеченных образцов, пропитанного смесью глицерина и минерального масла, показанных на рис. 3, б, можно определить по следующему выражению:

$$S_{рп} = S_0(1 - \alpha_k), \quad (1)$$

где  $S_0$  – общая свободная поверхность частиц порошка в рассматриваемом слое.

$$S_0 = S_{уд} \cdot m_{сл} = S_{уд} \cdot V_{об} \cdot \gamma_{ж} = 2897,56 \text{ см}^2,$$

где  $S_{уд}$  – удельная поверхность порошка ПЖРВ 2.200.26 (см. табл. 1);  $m_{сл}$  – масса расчетного слоя образца с площадью контакта с роликом 0,4938 см<sup>2</sup>;  $V_{об}$  – объем расчетного слоя пропитки, см<sup>3</sup>.

Относительный коэффициент контактной поверхности  $\alpha_k$  определяем по следующим формулам [19] и [20]:

$$\alpha_k = \Theta^2 \frac{\ln \beta_0 \Theta}{\ln \beta_0 \beta}; \quad \alpha_k = \frac{\Theta^2 \cdot \Delta \Theta}{\Pi_0}, \quad (2)$$

где  $\Theta$  – относительная плотность материала;  $\beta$  – его относительный объём;  $\beta_0$  – насыпной относительный объём шихты;  $\Pi_0$  – исходная пористость прессовки.

Поскольку

$$\begin{aligned} \Theta &= \frac{\gamma_{пт}}{\gamma_k}; \quad \beta = \frac{V_{пт}}{V_k}; \quad \gamma_{пт} = \gamma_k(1 - \Pi); \quad V_{пт} = V_k(1 + \Pi); \quad \beta_0 = \frac{V_{нас}}{V_k}; \\ V_{нас} &= \frac{m}{\gamma_{нас}}; \quad V_k = \frac{m}{\gamma_k}; \quad \beta_0 = \frac{m/\gamma_{нас}}{m/\gamma_k} = \frac{\gamma_k}{\gamma_{нас}}; \quad \Delta \Theta = \Theta - \Theta_0; \quad \Theta = 1 - \Pi; \\ \Pi_0 &= 1 - \Theta_0 = 1 - \frac{\gamma_{нас}}{\gamma_k}; \quad \Theta_0 = \frac{\gamma_{нас}}{\gamma_k}; \quad \Delta \Theta = 1 - \Pi - \frac{\gamma_{нас}}{\gamma_k}, \end{aligned} \quad (3)$$

то при пористости спеченных образцов 18–23 % согласно выражениям (2) и (3) получим

$$\alpha_k = (1 - \Pi)^2 \frac{\ln \gamma_k / \gamma_{нас} \cdot (1 - \Pi)}{\ln \gamma_k / \gamma_{нас} \cdot (1 + \Pi)} \approx 0,347 - 0,468;$$

$$\alpha_k = \frac{(1 - \Pi)^2 \cdot \left(1 - \Pi - \frac{\gamma_{нас}}{\gamma_k}\right)}{1 - \frac{\gamma_{нас}}{\gamma_k}} \approx 0,400 - 0,484.$$

Соответственно реакционная площадь поверхности спеченных образцов пористостью 18–23 % (см. рис. 3, б), пропитанных на глубину 0,1, по формуле (1) составит

$$S_{рп} = 2897,56 \cdot (1 - 0,43) = 1651,61 \text{ см}^2.$$

Активная поверхность таких же образцов из антифрикционного материала с шероховатостью  $R_a = 1,6\text{--}0,8$  мкм, полученных механической обработкой из компактного материала, составит около 3,2–3,4 см<sup>2</sup>. Следовательно, среднестатистические значения реакционной поверхности спеченных образцов из порошка ПЖРВ 2.200.26 отличаются от беспористых материалов примерно в 480 раз с учетом величины расчетного слоя пропитки.

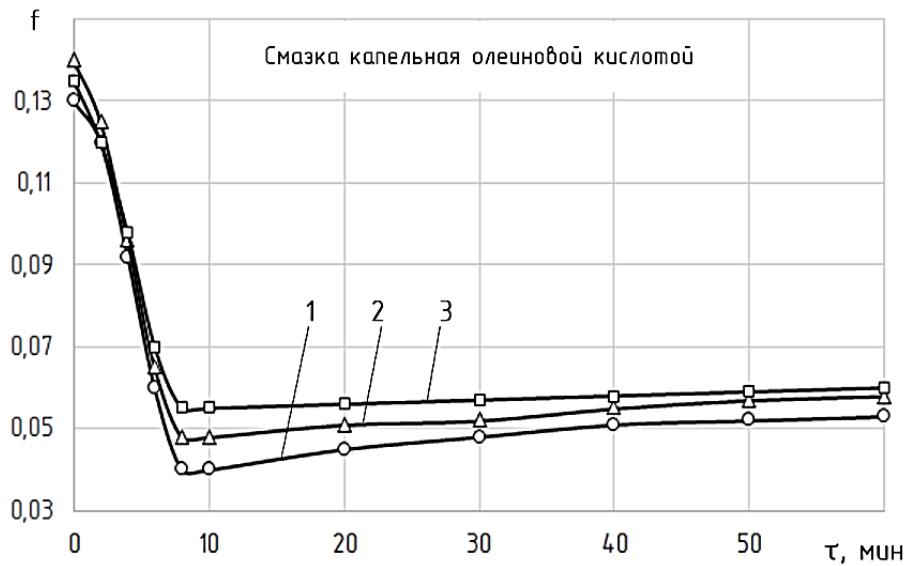
Если допустить, что реакционная площадь у спеченных образцов, определенная методом БЭТ ( $S_{уд} = 0,0429$  м<sup>2</sup>/г), равна удельной поверхности спеченных образцов из порошка железа ПЖРВ 2.200.26, то реакционная площадь в зоне трибосопряжения порошковых образцов (см. рис. 1, б) с массой активного слоя 0,3876 г составит 94,79 см<sup>2</sup>, что в 57 раз больше, чем образца, полученного обработкой давлением или литьем.

В то же время микро- и субмикроскопические поры, наряду со своеобразной микроструктурой частиц железных и медных порошков, формируют вогнутые и выпуклые участки металлической основы ячеистых антифрикционных материалов, что приводит к модификации химической активности атомов, которая варьируется в зависимости от размера и конфигурации пор, а также открытой поверхности частиц порошкообразных материалов. Это, по-видимому, является также одной из причин снижения времени приработки и интенсивного формирования промежуточных (вторичных структур) в процессе испытания порошковых материалов в среде ПАВ.

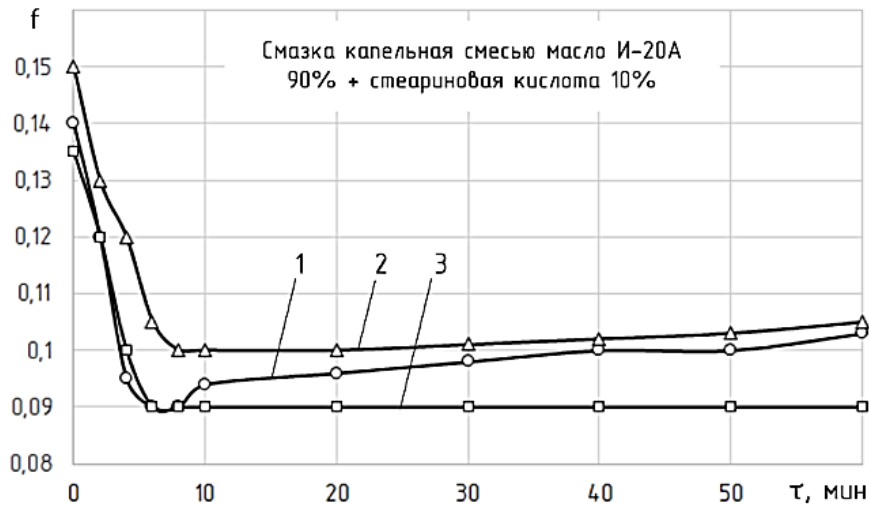
Установлено, что в случае разовой смазки олеиновой кислотой перед испытанием спеченных образцов из порошка железа ПЖРВ 2.200.26, пропитанных маслом И-20А (при 90 °С в течение 3 ч), время приработки сокращается, а минимальный коэффициент трения 0,045–0,055 (рис. 5, а, кривая 1) получен после испытания в течение 8 мин.

Значения коэффициента трения у спеченных образцов из смеси Fe + 2,5 % Cu и Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr, испытанных при тех же условиях, в установившемся режиме трения колебались в пределах 0,05–0,055 (рис. 5, а, кривые 2 и 3), а линейный износ всех образцов в установившемся режиме не превышал 0,05–0,07 мм.

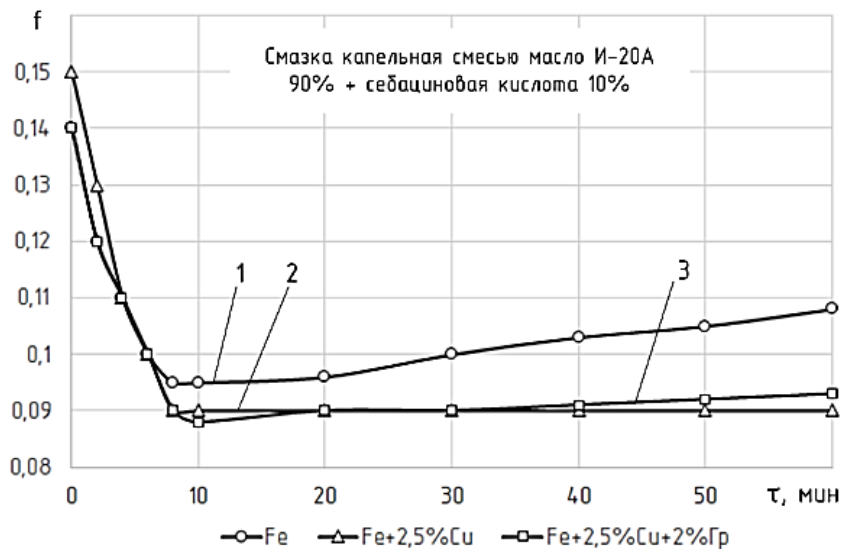
При смазке указанных выше образцов перед испытанием смесью стеариновой или себациновой кислот с маслом И-20А (в соотношении 10:90) коэффициент трения в установившемся режиме изменяется в процессе испытания в пределах 0,08–0,095 (рис. 5, б и в) и незначительно отличается от значений коэффициента трения для образцов, пропитанных только маслом И-20А (см. рис. 2, а).



а



б



в

**Рис. 5. Коэффициент трения для образцов из Fe (1); Fe + 2,5 % Cu (2); Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr (3) в зависимости от состава смазочного материала:**  
 а – олеиновая кислота; б – смесь масла И-20А + 10 % стеариновая кислота;  
 в – смесь масла И-20А + себациновая кислота

Износ (по линейному типу) у образцов, изготовленных из сплава железа с добавлением 2,5 % Cu и 2 % Gr, предварительно пропитанных маслом И-20А и дополнительно обработанных олеиновой кислотой или составом на базе стеариновой и себаценовой кислот с маслом И-20А перед испытаниями на трение. Показано, что износ снижается в 2–3 раза относительно образцов, пропитанных только маслом И-20А.

Еще одна часть спеченных образцов, изготовленных из композиции Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr, была обработана посредством пропитки смесью олеиновой кислоты и этилового спирта (в пропорции 30 к 70).

В ходе испытаний под воздействием нагрузки в 500 Н и скорости скольжения 1 м/с этап приработки этих образцов длился от 7 до 10 мин, за это время коэффициент трения уменьшился с первоначальных значений 0,13–0,15 до значения 0,05 (рис. 6, а, кривая 2). Линейный износ (рис. 6, в, кривая 2) остался в пределах 0,017–0,02 мм. Этот показатель в 3–4 раза превосходит результаты по износу, полученные при использовании глицерина как поверхностно-активного вещества (см. рис. 2). Также он в 2–3 раза лучше, чем при стандартном тестировании образцов, пропитанных только индустриальным маслом (рис. 6, в, кривая 1).

При пропитке таких же образцов спиртовым раствором стеариновой или себаценовой кислоты коэффициент трения после приработки в течение 10 мин колебался в пределах 0,08–0,09 (рис. 6, а, кривые 3 и 4), а линейный износ при этом не превышал 0,03–0,04 мм (рис. 6, б, кривые 3 и 4).

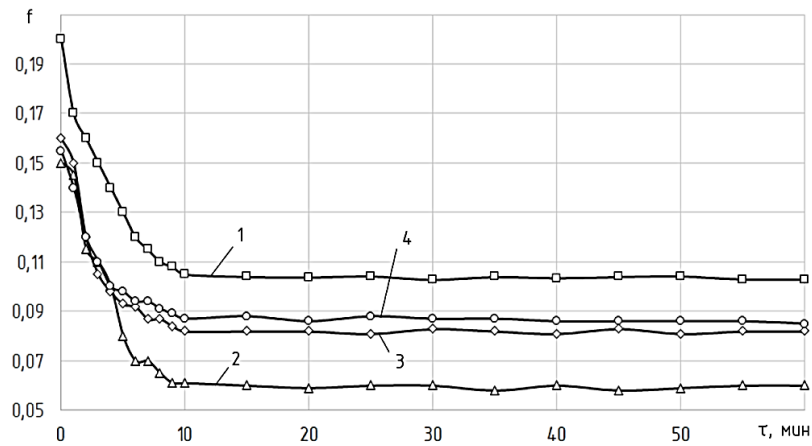
Следует отметить, что в случае смазывания капельной подачей растворами себаценовой и стеариновой кислот в спирте исследуемых материалов температура в зоне сопряжения «вал – образец» повышалась после испытания в течение 1 ч до 80–90 °С тогда, как при смазывании раствором олеиновой кислоты она не повышалась выше 45–47 °С (рис. 6, в).

При повышенных концентрациях карбоновых кислот температурное воздействие на смазку приводит к некоторому снижению их адгезии к трущимся поверхностям. Это связано с конечностью адсорбционных центров на стальной основе. Трибологические напряжения сдвига провоцируют изнашивание и отслоение поверхностных продуктов, таких как оксиды и гидроксиды. Кроме того, повышается температура контактной зоны, что, в свою очередь, интенсифицирует хемосорбцию с образованием карбоксилата железа [10].

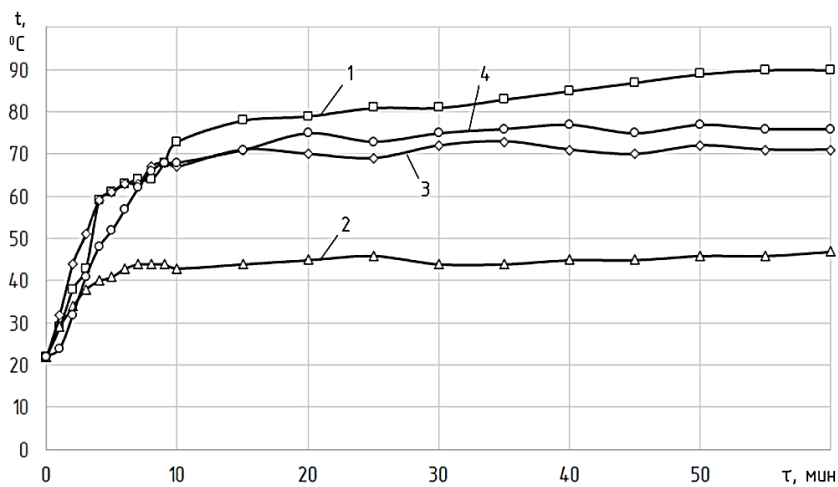
Сравнительный анализ коэффициентов трения для образцов, выполненных из сплава железа с добавлением 2,5 % Cu и 2 % Gr с последующей пропиткой маслом И-20А в течение капельной подачи в зону трения (на контртело) при испытаниях смеси олеиновой кислоты с этанолом, демонстрирует значительное уменьшение коэффициента трения с 0,09 до 0,008 в стабильном режиме работы.

При предварительной обработке (пропитка в течение 180 мин) образцов составом из масла И-20А и спиртового раствора олеиновой кислоты с последующим нанесением этой композиции капельным методом в зону трения коэффициент трения уменьшается до значений 0,006–0,003. Указанное уменьшение коэффициента трения, как нам представляется, обусловлено устранением из смазочного материала металлических частиц, образующихся в результате износа, что, в свою очередь, благоприятно сказывается на условиях трения. Это приводит к снижению интенсивности изнашивания при использовании данного масла. Некоторое увеличение периода приработки связано с необходимостью дополнительного времени для эвакуации изношенных металлических частиц из зоны трения.

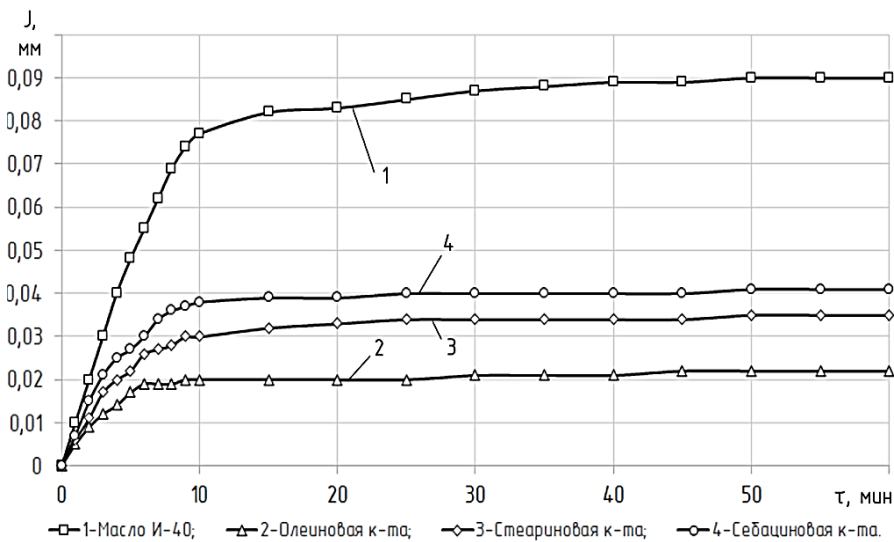
В ходе взаимодействия трущихся поверхностей образца и контртела, когда олеиновая кислота используется в качестве капельной смазки, существует вероятность вымывания молекул поверхностно-активных веществ, которые образуются в процессе трибодеструкции и могут не успеть адсорбироваться на контактирующих поверхностях. Этим можно объяснить умеренное увеличение износа при непрерывном капельном введении олеиновой кислоты (рис. 7, а) и наблюдаемый перенос части медных наночастиц на поверхность скольжения ролика (рис. 7, б и в).



а



б

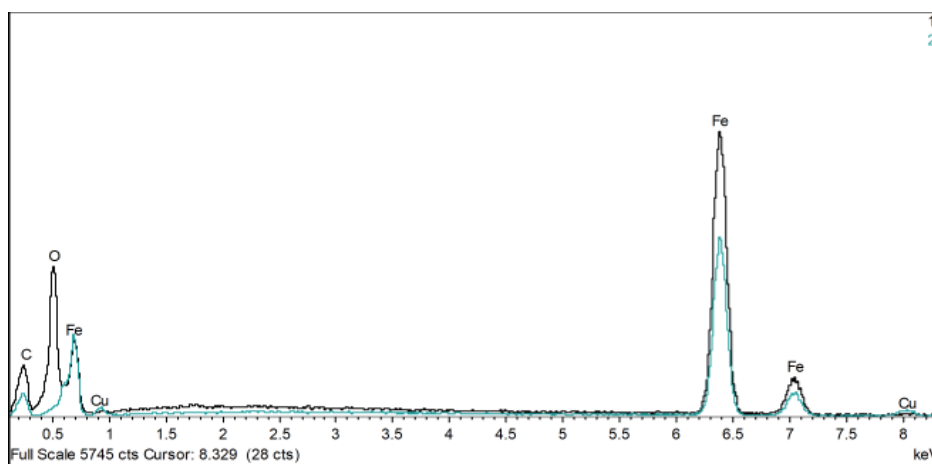
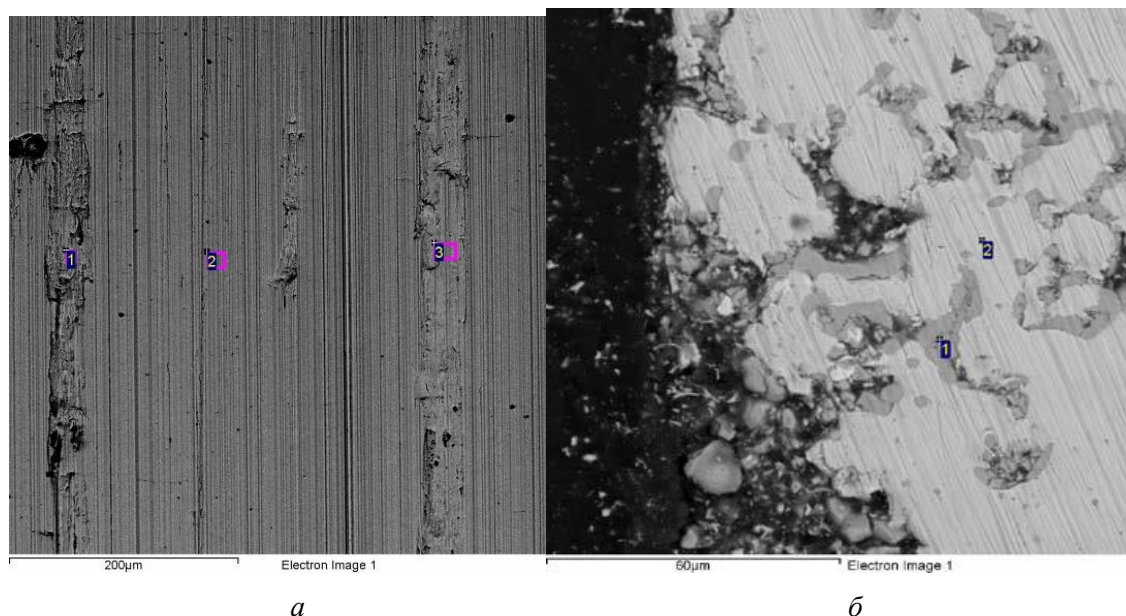


□—1-Масло И-40; ▲—2-Олеиновая к-та; ◆—3-Стеариновая к-та; ○—4-Себациновая к-та.

в

**Рис. 6. Влияние состава смазки на значения коэффициента трения (а), температуры (б) и износа (в) образцов, изготовленных из сплава Fe + 2 % Cu + 2 % Gr для различных смазочных материалов:**

1 – минеральное масло И-20 А; 2 – олеиновая кислота; 3 – стеариновая кислота; 4 – себациновая кислота



**Рис. 7. Микроструктура (а), вид поверхности трения стального ролика (б) и спектр EDX (в) ролика в зоне трения спеченного образца Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr, пропитанного олеиновой кислотой**

По мере роста содержания олеиновой кислоты в смазочном составе, используемом для обработки (пропитки) образцов, изготовленных из смеси Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr, наблюдается уменьшение коэффициента трения при испытаниях в условиях стабильного режима работы.

В ходе испытания при использовании только масла И-20А коэффициент трения находится в диапазоне  $f = 0,085-0,09$ , при добавлении в смазочный состав около 20 % раствора олеиновой кислоты в этиловом спирте (по объему) он также составлял  $\sim 0,09$ , но при дальнейшем увеличении уровня олеиновой кислоты в составе до 40–60 %  $f = 0,006-0,007$ .

Вероятно, наблюдаемый эффект обусловлен образованием добавочного слоя, облегчающего скольжение. Этот слой возникает из-за трибосинтеза новых, переходных слоев, структур или соединений, обогащенных наночастицами меди на поверхности стального ролика (см. рис. 7, б). Это влечет за собой снижение как коэффициента трения, так и интенсивности износа.

Полученные в ходе испытаний значения основных трибологических характеристик для порошкового сплава Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr с предварительной обработкой (пропитка различными смазочными композициями, содержащими карбоновые кислоты) и последующей капельной смазкой смазочными со-

ставами на основе индустриального масла, карбоновых кислот и глицерина представлены в табл. 2. Испытания проводились при нагрузке 500 Н (соответствует давлению 20 МПа) и скорости относительного скольжения 1,0 м/с.

Апробация полученных данных указывает, что наиболее перспективные и значимые показатели трибологических характеристик образцов после пропитки смазочным составом соответствуют минеральному маслу и раствору олеиновой кислоты в этиловом спирте, где содержание последнего варьируется от 40 до 60 % по объёму, в этом случае наблюдается незначительный износ образцов в сочетании с минимальными значениями коэффициента трения.

Повышенная устойчивость к износу связана с тем, что в отличие от индустриального масла И-20А олеиновая кислота в чистом виде слабо смачивает поверхность как стального ролика, так и частиц порошка образца. Это означает, что на старте приработки, когда антифрикционные свойства материала во многом определяются характеристиками используемого смазочного материала, применение одной лишь олеиновой кислоты или ее концентрированной смеси с маслом (свыше 60 %) создает более жесткие условия трения, нежели при использовании чистого масла, как следствие, наблюдается ускоренный износ детали. Однако по мере продолжения работы устройства процессы разложения ПАВ под действием трения и образование вторичных структур приводят к существенному улучшению условий смазывания, что вызывает заметное уменьшение коэффициента трения и переход всей системы в режим минимального износа.

Таблица 2

**Влияние состава смазочных материалов на триботехнические свойства сплава Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr**

Способ смазки		Коэффициент трения в установленном режиме $f$	Линейный износ образца $I$ , мм	Температура в зоне контакта при установленном режиме трения $t$ , °С
Пропитка	Одноразовая (капельная)			
Без пропитки	И-20А	0,01–0,095	0,115–0,120	90
И-20А	Олеиновая кислота 100 %	0,055–0,060	0,015–0,017	47
И-20А	И-20А 90 % + стеариновая кислота 10 %	0,090–0,095	0,060–0,065	71
И-20А	И-20А 90 % + себациновая кислота 10 %	0,090–0,095	0,060–0,070	76
Салициловая кислота 30 % + спирт 70 %	И-20А 90 % + салициловая кислота 10 %	0,058–0,07	0,040–0,050	54
Пальмитовая кислота 30 % + спирт 70 %	И-20А 90 % + пальмитовая кислота 10 %	0,105–0,110	0,060–0,070	72
Гликолевая кислота 30 % + спирт 70 %	И-20А 90 % + гликолевая кислота 10 %	0,100–0,110	0,035–0,040	60
Олеиновая кислота 30 % + спирт 70 %	Олеиновая кислота 100 %	0,040–0,060	0,012–0,015	49
Гликолевая кислота 30 % + спирт 70 %	Олеиновая кислота 100 %	0,021–0,027	0,015–0,018	33
Гликолевая кислота 20 % + спирт 50 % + глицерин 30 %	Олеиновая кислота 67 % + глицерин 33 %	0,006–0,008	0,010–0,012	33

Частицы порошка железа в состоянии поставки и спеченные изделия из них характеризуются наличием оксидных и гидроксидных пленок на их поверхностях, это способствует поглощению (адсорбции) молекул жирных кислот поверхностью материала. В ходе фрикционного взаимодействия происходит частичный распад молекул жирных кислот с образованием карбоксилат-анионов ( $R-COO^-$ ) и катионов водорода ( $H^+$ ). Высвобождающиеся катионы стимулируют химические реакции с атомами железа на поверхности, и карбоксилат-анионы связываются с атомами железа, формируя соединения – карбоксилат

железа. Исследования показывают, что карбоновые кислоты способны формировать бидентатные связи, где атомы кислорода карбоксильной группы взаимодействуют с атомами железа [21].

Соответственно оптимальные условия смазки, характеризующиеся минимальным износом образцов и низким коэффициентом трения (см. табл. 2), достигаются путем дозированной подачи смазочного состава смеси 40–60 % олеиновой кислоты и индустриального масла И-20А непосредственно в зону трения. Благодаря лучшей смачивающей способности масло на начальной стадии вытесняет ПАВ с трущихся поверхностей, тем самым уменьшая износ в период приработки, а далее, по мере формирования полярных молекул ПАВ в результате трибодеструкции, они заменяют молекулы масла на поверхности трения. Этот процесс обеспечивает снижение коэффициента трения до наблюдаемых величин и переход к режиму трения с минимальным износом (безызнотный режим).

### **Заключение**

Установлено, что ключевое воздействие на реакционную активность спеченных антифрикционных материалов на базе железа и изделий из них оказывает удельная площадь поверхностей частиц порошков в зоне трения, что ведет к сокращению периода приработки и стимулирует образование вторичных структур в ходе трения в среде ПАВ.

Введение карбоновых кислот в состав смазочных материалов сокращает время приработки образцов из сплава Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr с пористой структурой (18–22 %), пропитанных смесью масла И-20А и олеиновой кислоты в спиртовом растворе, до 8–10 мин. Отсутствие ПАВ увеличивает продолжительность этого этапа до 30–40 мин, при этом образцы из компактных сплавов на основе бронзы или чугуна требуют в 5–8 раз больше времени для приработки в сравнении с исследуемыми порошковыми материалами.

При пропитке пористых порошковых образцов из железомеднографитовых материалов и дозированной (точечной) подаче в зону трения смазочного состава на основе 60–70 % масла И-20А с добавлением спиртового раствора олеиновой кислоты значительно уменьшается износ в период приработки и в установившемся режиме работы значения коэффициента трения не выходит за пределы 0,004–0,006. Это позволяет использовать раствор олеиновой кислоты в этаноле для пропитки пористых втулок подшипников скольжения для порошковых антифрикционных материалов на основе Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr и их смазки смесью масла и олеиновой кислоты непосредственно перед монтажом на вал с целью получения высоких трибологических характеристик.

### **Список литературы**

- 1 **Бурлакова, В. Э.** Трибоэлектрохимия эффекта безызнотности / В. Э. Бурлакова // Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2005. – 209 с. – ISBN 5-7890-0323-0.
- 2 **Гаркунов, Д. Н.** Триботехника (износ и безызнотность) / Д. Н. Гаркунов // Москва : Издательство МСХА, 2001. – 616 с. – ISBN 5-94327-004-3.
- 3 Трибоэлектрохимия эффекта безызнотности при трении. Механизм формирования граничных слоев на стали в самоорганизующейся трибосистеме «медь – глицерин – сталь» / А. С. Кужаров, В. Е. Бурлакова, Е. Г. Зодошенко [и др.] // Трение и износ. – 1998. – Т. 19, № 6. – С. 768–778. – ISSN 5-7890-0323-0.
- 4 **Кужаров, А. С.** Концепция безызнотности в современной трибологии / А. С. Кужаров // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014. – № 2. – С. 23–31. – ISSN 978-88-908185-09.
- 5 **Поляков, С. А.** Теоретический анализ основных механизмов эволюции трибосистем при избирательном переносе // Долговечность трущихся

### **References**

- 1 **Burlakova, V. E.** Triboelectrochemistry of the wear-free effect / V. E. Burlakova // Rostov-on-Don : DSTU Publishing Center, 2005. – 209 p. – ISBN 5-7890-0323-0.
- 2 **Garkunov, D. N.** Tribotechnics (wear and wear-free) / D. N. Garkunov // Moscow : Publishing House of the Moscow Agricultural Academy, 2001. – 616 p. – ISBN 5-94327-004-3.
- 3 Triboelectrochemistry of the wear-free effect during friction. Mechanism of boundary layer formation on steel in the self-organizing tribosystem "copper – glycerin – steel" / A. S. Kuzharov, V. E. Burlakova, E. G. Zodoshenko [et al.] // Friction and Wear. – 1998. – Vol. 19, No. 6. – P. 768–778. – ISSN 5-7890-0323-0.
- 4 **Kuzharov, A. S.** The concept of wearlessness in modern tribology / A.S. Kuzharov // University News. North-Caucasian region. Technical sciences. – 2014. – No. 2. – P. 23–31. – ISSN 978-88-908185-09.
- 5 **Polyakov, S. A.** Theoretical analysis of the basic mechanisms of the evolution of tribosystems at selective transfer // Durability of rubbing machine

деталей машин : сборник трудов. – Москва : Машиностроение, 1988. – С. 3–26.

6 **Kajita, S.** Friction Modification by Shifting of Phonon energy Dissipation in Solid Atoms / S. Kajita, M. Tohyama, H. Washizu // Tribology Online. – 2015 (10). – No. 2. – P. 156–161.

7 **Заславский, Ю. С.** Трибология смазочных материалов / Ю. С. Заславский. – Москва : Химия, 1991. – 240 с.

8 **Бурлакова, В. Е.** Влияние концентрации органической кислоты в составе смазки на трибологические характеристики пары трения / В. Е. Бурлакова, Е. Г. Дроган // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 24–30. – DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-1-24-30.

9 **Кужаров, А. С.** Особенности эволюционного перехода трибологической системы латунь – глицерин – сталь в режим безызностного трения / А. С. Кужаров, Р. М. Марчак // Доклады РАН. – 1997. – Т. 354, № 5. – С. 642–644.

10 Nanotribology of Aqueous Solutions of Monobasic Carboxylic Acids in a Copper Alloy–Steel Tribological Assembly / V. E. Burlakova, A. A. Milov, E. G. Droган [et al.] // Journal of Surface Investigation : X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2018. – Vol. 12, No. 6. – P. 1108–1116.

11 Mechanical properties and size effects of self-organized film / V. E. Burlakova, A. I. Tyurin, E. G. Droган [et al.] // Journal of Tribology. – 2019. – Vol. 141, Iss. 5. – P. 1–7.

12 Characterization and nano-mechanical properties of tribofilms using Cu nanoparticles as additives / H. L. Yu, Y. Xu, P. J. Shi [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 203, No. 1–2. – P. 28–34.

13 **Кужаров, А. С.** Физико-химические основы смазочного действия в режиме избирательного переноса / А. С. Кужаров // Эффект безызносности и триботехнологии. – 1992. – № 2. – С. 3–14.

14 **Гасанов, Б. Г.** Порошковые антифрикционные материалы и смазки для самоорганизующихся узлов трения / Б. Г. Гасанов, А. А. Азаренков // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2004. Спецвыпуск. – С. 118–123. – ISSN 1560-3644.

15 **Дорофеев, Ю. Г.** Конструкционные порошковые материалы и изделия / Ю. Г. Дорофеев, Л. Г. Мариненко, В. И. Устименко. – Москва : Металлургия, 1986. – 144 с.

16 **Ермаков, С. С.** Порошковые стали и изделия / С. С. Ермаков, Н. Ф. Вязников. – Ленинград : Машиностроение, 1990. – 319 с.

17 **Патент № 2823582 Российская Федерация, МПК G01N 3/56 (2006/01).** Автономный узел трения для испытательного оборудования на трение

parts : Collection of works. – Moscow : Mashinostroenie, 1988. – P. 3–26.

6 **Kajita, S.** Friction modification by shifting of phonon energy dissipation in solid atoms / S. Kajita, M. Tohyama, H. Washizu // Tribology Online. – 2015 (10). – No. 2. – P. 156–161.

7 **Zaslavsky, Yu. S.** Tribology of lubricants / Yu. S. Zaslavsky. – Moscow : Khimiya, 1991. – 240 p.

8 **Burlakova, V. E.** The effect of the concentration of organic acid in the lubricant on the tribological characteristics of a friction pair / V. E. Burlakova, E. G. Droган // Vestnik of Don State Technical University. – 2019. – Vol. 19, No. 1. – P. 24–30. – DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-1-24-30.

9 **Kuzharov, A. S.** Features of the evolutionary transition of brass-glycerin-steel tribological system to the endless friction mode / A. S. Kuzharov, R. M. Marchak // Reports of the Russian Academy of Sciences. – 1997. – Vol. 354, No. 5. – P. 642–644.

10 Nanotribology of Aqueous Solutions of Monobasic Carboxylic Acids in a Copper Alloy–Steel Tribological Assembly / V. E. Burlakova, A. A. Milov, E. G. Droган [et al.] // Journal of Surface Investigation : X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2018. – Vol. 12, No. 6. – P. 1108–1116.

11 Mechanical properties and size effects of self-organized film / V. E. Burlakova, A. I. Tyurin, E. G. Droган [et al.] // Journal of Tribology. – 2019. – Vol. 141, Iss. 5. – P. 1–7.

12 Characterization and nano-mechanical properties of tribofilms using Cu nanoparticles as additives / H. L. Yu, Y. Xu, P. J. Shi [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 203, No. 1–2. – P. 28–34.

13 **Kuzharov, A. S.** Physical and chemical bases of lubricating action in the mode of selective transfer / A. S. Kuzharov // Effect of wearlessness and tribotechnology. – 1992. – No. 2. – P. 3–14.

14 **Gasanov, B. G.** Powder antifricition materials and lubricants for self-organizing friction units / B. G. Gasanov, A. A. Azarenkov // University News. North-Caucasian region. Technical sciences. – 2004. Special issue. – P. 118–123. – ISSN 1560-3644.

15 **Dorofeev, Yu. G.** Constructive powder materials and products / Yu. G. Dorofeev, L. G. Marinenko, V. I. Ustimenko // Moscow : Metallurgy, 1986. – 144 p.

16 **Ermakov, S. S.** Powder steels and products / S. S. Ermakov, N. F. Vyaznikov // Leningrad : Mashinostroenie, 1990. – 319 p.

17 **Patent No. 2823582 Russian Federation, IPC G01N 3/56 (2006/01).** Autonomous friction unit for friction and wear testing equipment :

и износ : № 2024109067 : заявл. 04.04.2024 : опублик. 24.07.2024 / Б. Г. Гасанов, А. А. Азаренков, Е. В. Харченко ; заявитель Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – 8 с.

18 Патент № 2823909 Российская Федерация, МПК G01N 3/56 (2006/01). Машина трения для сравнительных испытаний антифрикционных материалов : № 2024109068 : заявл. 04.04.2024 : опублик. 30.07.2024 / Б. Г. Гасанов, А. А. Азаренков, Е. В. Харченко ; заявитель Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – 8 с.

19 Жданович, Г. М. Сопротивление порошковых материалов / Г. М. Жданович. – Минск : Бест-принт, 1999. – 340 с.

20 Балшин, М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна / М. Ю. Балшин. – Москва : Металлургия, 1972. – 335 с.

21 Simič, R. Adsorption mechanisms for fatty acids on DLC and steel studied by AFM and tribological experiments / R. Simič, M. Kalin // Applied Surface Science, 2013. – Vol. 283. – P. 460–470.

No. 2024109067 : declared. 04.04.2024 : published 24.07.2024 / B. G. Gasanov, A. A. Azarenkov, E. V. Kharchenko ; applicant South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M. I. Platov. – 8 p.

18 Patent No. 2823909 Russian Federation, IPC G01N 3/56 (2006/01). Friction machine for comparative tests of antifriction materials : No. 2024109068 : declared 04.04.2024 : published 30.07.2024 / B. G. Gasanov, A. A. Azarenkov, E. V. Kharchenko ; applicant South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M. I. Platov. – 8 p.

19 Zhdanovich, G. M. Resistance of powder materials / G. M. Zhdanovich. – Minsk : Best-print, 1999. – 340 p.

20 Balshin, M. Yu. Scientific foundations of Powder Metallurgy and Fiber Metallurgy / M. Yu. Balshin // Moscow : Metallurgy, 1972. – 335 p.

21 Simič, R. Adsorption mechanisms for fatty acids on DLC and steel studied by AFM and tribological experiments / R. Simič, M. Kalin // Applied Surface Science, 2013. – Vol. 283. – P. 460–470.

*B. G. Gasanov, E. V. Kharchenko, G. G. Panchvidze*

#### IMPROVING THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF POWDERED IRON-COPPER-GRAPHITE ALLOYS

**Abstract.** The effect of the chemical composition of lubricants containing surfactants on the coefficient of friction, temperature, and linear wear of iron-based powder antifriction alloys is shown.

The conducted research has shown that saturation of porous structures made of Fe, Fe + Cu and Fe + 2.5% Cu + 2% Gr with lubricants based on carboxylic acids or other surfactants (surfactants), followed by their application in the area of contact of rubbing elements, significantly improves the tribological characteristics of the studied powder materials. The experiments demonstrated that the use of a mixture of mineral oil I-20A and an alcohol solution of oleic acid as a lubricant lead to a significant reduction in the break-in period of the samples, by approximately 4-6 times. In addition, there is a decrease in the coefficient of friction, which does not exceed 0.01-0.007 in a stable mode, after which the system practically switches to a mode of operation with minimal wear.

Using the electron probing microanalysis, the features of the formation of intermediate structures improving tribological properties of powder materials based on iron-copper-graphite, as well as the influence and composition of lubricants containing surfactants on microstructure of the surface layer of friction pairs were determined.

**Keywords:** powdered antifriction materials, intermediate structures, tribological properties, surfactants, and self-organizing systems.

**For citation:** Gasanov, B. G. Improving the tribological characteristics of powdered iron-copper-graphite alloys / B. G. Gasanov, E. V. Kharchenko, G. G. Panchvidze // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 161–175. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_161.

**Сведения об авторах****Гасанов Бадрудин Гасанович**

Южно-Российский государственный  
политехнический университет (НПИ)  
имени М. И. Платова, Новочеркасск,  
кафедра «Автомобили  
и транспортно-технологические  
комплексы»,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: gasanov.bg@gmail.com

**Харченко Евгений Вячеславович**

Южно-Российский государственный  
политехнический университет (НПИ)  
имени М. И. Платова, Новочеркасск,  
кафедра «Автомобили  
и транспортно-технологические  
комплексы»,  
старший преподаватель,  
e-mail: hariton\_n@mail.ru

**Панчвидзе Георгий Гелаевич**

Южно-Российский государственный  
политехнический университет (НПИ)  
имени М. И. Платова, Новочеркасск,  
кафедра «Автомобили  
и транспортно-технологические  
комплексы»,  
аспирант,  
e-mail: gelapan15@yandex.ru

**Information about the authors****Gasanov Badrudin Gasanovich,**

South-Russian State Polytechnic University (NPI)  
named by M. I. Platov, Novochoerkassk,  
Chair “Automobiles and Transport-Technological  
Complexes”,  
Doctor of Engineering Science, Professor,  
e-mail: gasanov.bg@gmail.com

**Kharchenko Evgeniy Vyacheslavovich**

South-Russian State Polytechnic University (NPI)  
named by M. I. Platov, Novochoerkassk,  
Chair “Automobiles and Transport-Technological  
Complexes”,  
Senior Lecturer,  
email: hariton\_n@mail.ru.

**Panchvidze Giorgiy Gelaevich**

South-Russian State Polytechnic University (NPI)  
named by M. I. Platov, Novochoerkassk,  
Chair “Automobiles and Transport-Technological  
Complexes”,  
Postgraduate Student,  
e-mail: gelapan15@yandex.ru

А. Г. Исаев, Э. В. Бивзюк, И. М. Чукарина

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

**Аннотация.** Рассматривается проблема повышения эффективности технологического процесса упрочнения сварных стержневых конструкций транспортных машин. Актуальность исследования обусловлена необходимостью улучшения качества и надежности несущих конструкций при одновременном обеспечении безопасных условий труда. В работе описана роботизированная система, позволяющая повысить эффективность технологического процесса упрочнения сварных стержневых конструкций транспортных машин. Предложена структура роботизированного технологического комплекса, включающая устройство фиксации и поворота упрочняемой детали, исполнительный модуль с шарико-стержневым упрочнителем и систему управления технологическими параметрами. Разработаны алгоритмы формирования траектории движения инструмента и выбора режимов обработки, обеспечивающие заданные параметры качества. Практическая значимость работы подтверждается результатами внедрения: автоматизированная система обеспечивает повышение усталостной долговечности конструкций на 40–50 % по сравнению с ручной обработкой. Значительно улучшаются условия труда, снижается уровень вибрации, полностью исключаются ручные операции в зоне обработки.

**Ключевые слова:** шарико-стержневой упрочнитель, сварное соединение, роботизированный технологический комплекс.

**Для цитирования:** Исаев, А. Г. Повышение эффективности технологического процесса упрочнения несущих конструкций транспортных машин / А. Г. Исаев, Э. В. Бивзюк, И. М. Чукарина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 176–181. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_176.

### Введение

Надежность несущих конструкций транспортных машин является важным вопросом в транспортном машиностроении. Большинство таких конструкций изготавливается с помощью сварки, а прочность в зонах сварных соединений в свою очередь и определяет надежность таких конструкций. Для повышения качества поверхностного слоя несущих конструкций используются разные методы, одним из которых является упрочнение поверхности детали шарико-стержневым упрочнителем (ШСУ), показавшим свою эффективность при местном упрочнении деталей [1–3].

Устройство широко применяется в различных сферах машиностроения и может использоваться как совместно с обрабатывающим станком, так и вручную. Однако стоит отметить, что при ручном процессе упрочнения оператор длительное время находится в непосредственной близости от источника интенсивных ударных нагрузок. При этом человек-оператор является неотъемлемой частью системы «человек – машина – производственная среда», и на него действует ряд опасных и вредных производственных факторов во время реализации процесса упрочнения (рис. 1).

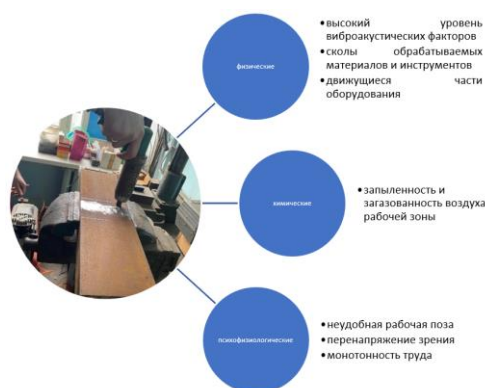


Рис. 1. Опасные и вредные факторы, присущие упрочнению методом ШСУ

Среди таких опасных и вредных факторов можно выделить повышенные уровни шума и вибрации. Уровень звукового давления, как правило, существенно превышает предельно допустимые значения, а спектр шума характеризуется выраженной высокочастотной составляющей. Превышения в рабочей зоне представлены, как показано на рис. 2 [2].

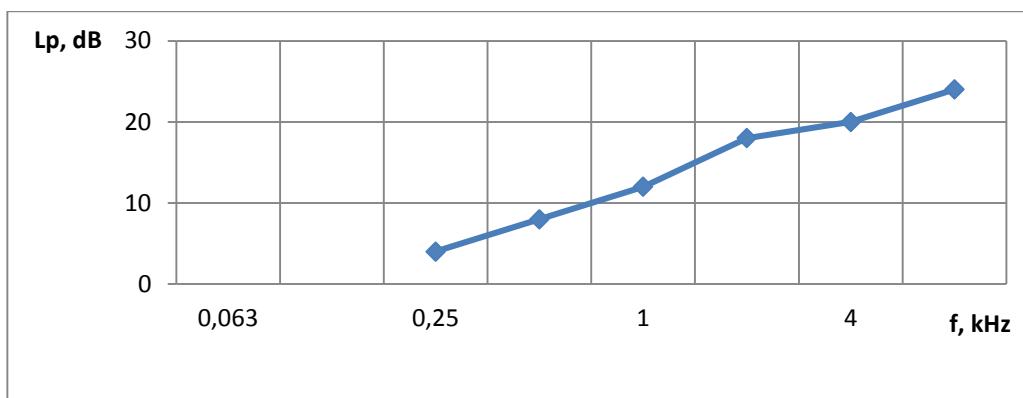


Рис. 2. Превышение уровней звукового давления при ручной обработке

Превышение виброакустических факторов при реализации процесса упрочнения является существенным ограничением и формирует необходимость разработки специализированных роботизированных и автоматизированных систем, которые включают:

- обеспечение безопасных условий за счет увеличения расстояния;
- обеспечение безопасных условий за счет снижения времени;
- стабилизации параметров процесса.

За последние годы роботизация процессов обработки деталей машин широко развивается. В работах Н. Liu [4, 5] показано, что применение промышленных роботов с ударным инструментом позволяет сформировать стабильные поля пластической деформации из нержавеющей стали и жаростойких сплавов. Параллельно развиваются роботизированные системы дробеструйного упрочнения для автомобильной и авиационной отрасли.

В работах Х. Ке [6] показано повышение стабильности шероховатости за счет использования робота-ассистента при полировании. Аналогичные результаты получены В. Zhang [7] по роботизированному ленточному шлифованию лопаток авиадвигателей, где робот обеспечивает точную траекторию и контролируемое снятие материала при сложной пространственной геометрии.

В связи с этим актуальной является разработка конструкции автоматизированной системы для процесса упрочнения поверхностей деталей методом ШСУ, обеспечивающей как качество обработки, так и снижение неблагоприятных факторов, что позволит обеспечить безопасные условия эксплуатации технологического процесса упрочнения стержневых конструкций транспортных машин.

### **Основная часть**

Анализ условий эксплуатации технологического процесса упрочнения поверхностей деталей представляет целесообразным разработать специальное автоматизированное устройство для упрочнения стержневых деталей различных геометрических размеров, таких как швеллера, уголки, двутавровый профиль и стержневые конструкции.

Конструкция системы включает три основных узла:

- механизм подачи и фиксации обрабатываемой детали;
- механизм упрочнения;
- система управления.

Подача стержневых конструкций осуществляется по рольгангам, образующих направляющие пути для детали.

Учитывая, что упрочняющий инструмент имеет привод от компрессора, в качестве исполнительного механизма фиксации и поворота детали принята пневматическая система. Механизм фиксации включает два пневматических цилиндра, которые через рычажную систему приводят в действие универсальные прижимные колодки. Форма колодок выполнена таким образом, чтобы обеспечить надежную фиксацию конструкций различных геометрических размеров без смены оснастки, либо с минимальной переналадкой.

Для обеспечения возможности упрочнения всех поверхностей профиля детали механизм оборудован системой поворота, позволяющей последовательно ориентировать обрабатываемую поверхность относительно требуемого положения к упрочняющему устройству.

Механизм упрочнения представляет собой координатный исполнительный модуль с двумя перпендикулярными подачами, обеспечивающими перемещение устройства относительно детали. Перемещение инструмента осуществляется за счет шарико-винтовой передачи, что позволяет получать высокую точность позиционирования и повторяемость траектории обработки. Кинематическая схема автоматизированной системы представлена на рис. 3.

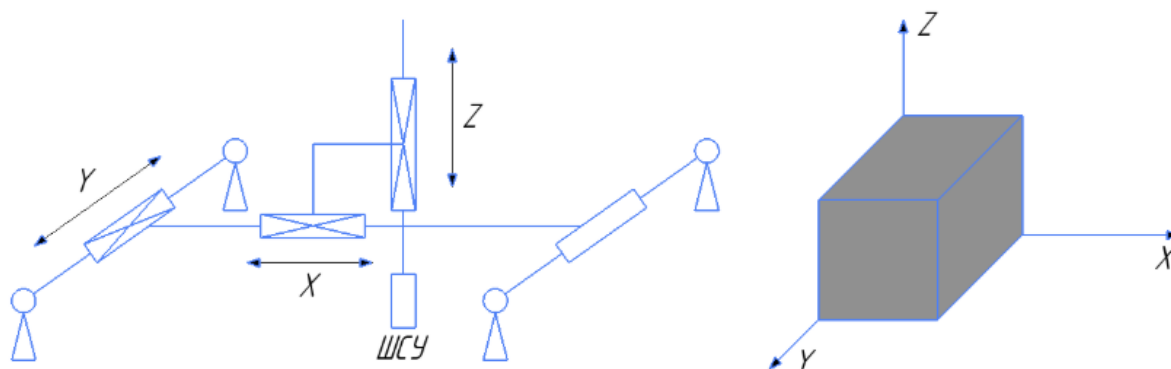


Рис. 3. Кинематическая схема системы

Конструкция механизма включает привод продольной и поперечной подачи упрочняющего устройства. Согласованная работа приводов позволяет формировать прямолинейные и ступенчатые траектории перемещения инструмента в плоскости обрабатываемой зоны и выдержать заданный шаг между переходами.

Для контроля положения исполнительного органа и его фиксации в заданных точках предусмотрена сенсорная система и система управления, обеспечивающая автоматизированное задание режимов и последовательности движения упрочнителя и обрабатываемой детали.

Общий вид системы представлен на рис. 4, показана компоновка узлов станда: механизм подачи и фиксации детали, механизм подачи упрочнителя, а также элементы системы управления. Пространственное разделение органов и рабочего места оператора позволяет реализовать дистанционное управление процессом упрочнения и снизить влияние виброакустических факторов, что позволяет также обеспечить безопасные условия эксплуатации рассматриваемого технологического процесса.

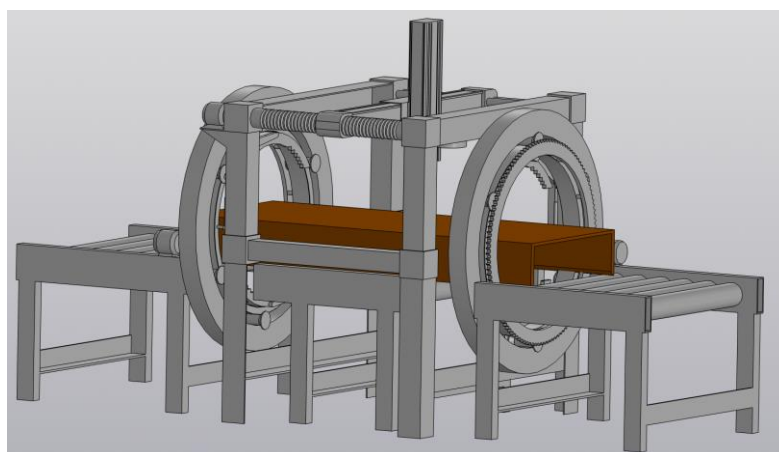
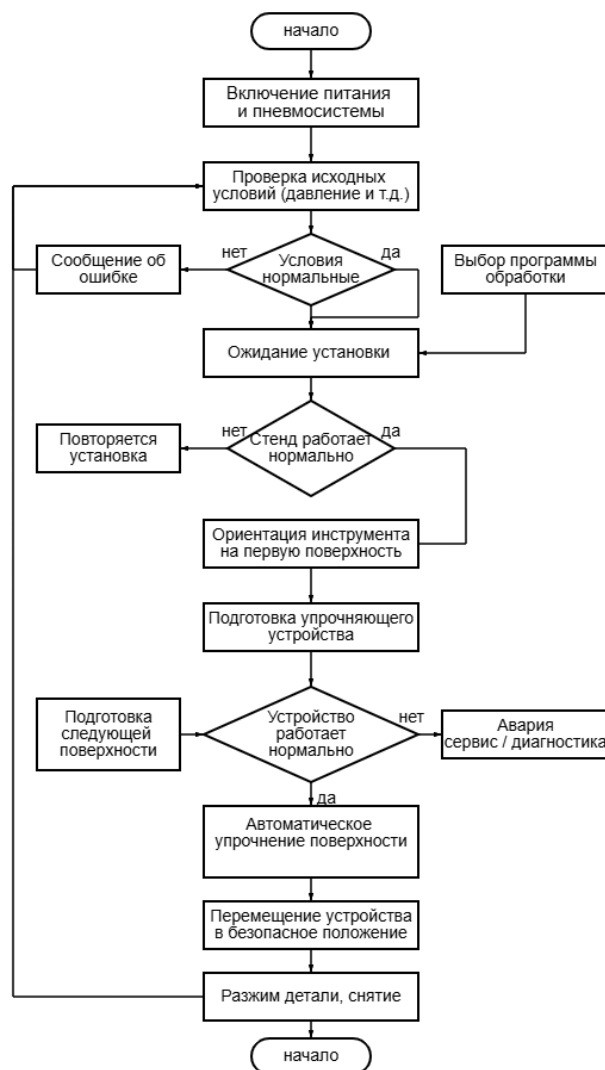


Рис. 4. Общий вид автоматизированной системы

На рис. 5 представлена блок-схема алгоритма работы автоматизированной системы.



**Рис. 5. Алгоритм работы устройства**

Алгоритм включает этапы инициализации, подготовки к упрочнению, выполнения данного цикла и завершения работы. На начальном этапе производится включение питания и пневмосистемы, проверка исходных условий, таких как давление сжатого воздуха, отсутствие аварийных сигналов и т. д. Далее оператор задает параметры технологического процесса упрочнения и параметры обрабатываемой детали, после чего выполняется установка и фиксация детали. Механизм поворота ориентирует профиль таким образом, чтобы обрабатываемая поверхность находилась в рабочем положении относительно упрочнителя. Далее система переходит в автоматический режим.

Качество упрочняющего наклепа определяется выбором рациональных режимов обработки. Для их оптимизации были проведены экспериментальные исследования, устанавливающие взаимосвязь между параметрами процесса (скорость вращения детали, осевая подача, частота ударов шарика, величина статического усилия) и характеристиками упрочненного слоя (глубина наклепа, степень пластической деформации, шероховатость поверхности). На основе регрессионного анализа полученных данных создана математическая модель, позволяющая прогнозировать результат обработки. В ходе процесса оператор контролирует непрерывный технологический процесс. После обработки одной поверхности устройство переориентирует деталь, и цикл повторяется. По окончании цикла устройство перемещается в безопасное положение, деталь разжимается и снимается. Такой подход устраняет влияние человеческого фактора и обеспечивает воспроизводимость результатов от детали к детали.

Применение предложенной автоматизированной системы упрочнения методом ШСУ обеспечивает более высокую стабильность технологического процесса. Для стержневых конструкций, работающих в условиях переменных нагрузок, повышение однородности свойств поверхностного слоя является принципиально важным с точки зрения усталостной надежности.

Апробация разработанного комплекса проводилась на сварных рамах грузовых автомобилей. Сравнительный анализ показал, что автоматизированное ШСУ обеспечивает повышение усталостной долговечности конструкций в среднем на 40–50 %, по сравнению с ручной обработкой дробью, при одновременном снижении разброса показателей на 30 %. Это связано с высокой однородностью наклепа по всей протяженности сложноконтурных стержней. Значительно улучшаются условия труда: уровень вибрации на рабочем месте не превышает допустимых нормативов, а процесс полностью исключает ручные операции в зоне обработки. Предварительный расчет экономической эффективности для условий серийного производства демонстрирует, что внедрение комплекса окупается за 2–3 года за счет снижения брака по усталостным трещинам, увеличения межремонтного пробега машин и высвобождения персонала. Таким образом, разработанная роботизированная система представляет собой готовое технологическое решение для модернизации производственных линий изготовления несущих конструкций транспортной техники.

### **Выводы**

В результате выполненных исследований разработана автоматизированная система для реализации процесса упрочнения поверхностей деталей методом шарико-стержневого упрочнения. Предложенная конструкция устройства и алгоритм работы обеспечивают автоматизированную подачу, фиксацию и ориентацию детали, программное перемещение устройства по заданной траектории и стабилизацию процесса обработки. Это позволяет повысить однородность свойств поверхностного слоя и одновременно обеспечить безопасные условия эксплуатации рассматриваемого технологического процесса, за счет снижения виброакустических факторов, что делает систему перспективной для внедрения в серийное производство.

### **Список литературы**

- 1 **Тамаркин, М. А.** Обеспечение акустической безопасности при обработке плоских деталей шарико-стержневым упрочнителем / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, А. Г. Исаев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 2 (63). – С. 12–19. – DOI 10.12737/article\_5ac49dc30826b3.63726809.
- 2 **Тамаркин, М. А.** Обеспечение акустической безопасности технологического процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем плоских деталей при достижении заданных параметров поверхностного слоя / М. А. Тамаркин, А. Н. Чукарин, А. Г. Исаев // Наукоедение. – 2016. – № 6. – С. 28. – ISSN 2223-5167.
- 3 **Исаев, А. Г.** Обеспечение акустической безопасности при шарико-стержневом упрочнении с учетом достижения заданных параметров качества поверхностного слоя (на примере плоских деталей) : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.26.01, 05.02.08 / Исаев Александр Геннадьевич. – Ростов-на-Дону, 2017. – 129 с.
- 4 Robotic hammer peening-induced martensite in austenitic steels: Spatial distributions of plastic deformation and phase transformation / H. Liu, Ch. K. Ivan Tan, Yu. Wei [et al.] // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 87. – P. 297–301. – DOI 10.1016/j.procir.2020.02.033.
- 5 Laser-cladding and robotic hammer peening of stainless steel 431 on low alloy steel 4140 for surface enhancement and corrosion protections / H. Liu, Ch. K. I. Tan, X. Dong [et al.] // Journal of Adhesion Science and Technology. – 2022. – Vol. 36, No. 21.

### **References**

- 1 **Tamarkin, M. A.** Ensuring acoustic safety when processing flat parts with a ball-rod hardener / M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, A. G. Isaev // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2018. – No. 2 (63). – P. 12–19. DOI10.12737/article\_5ac49dc30826b3.63726809.
- 2 **Tamarkin, M. A.** Ensuring the acoustic safety of the technological process of processing flat parts with a ball-rod hardener when achieving the specified parameters of the surface layer / M. A. Tamarkin, A. N. Chukarin, A. G. Isaev // Naukovedenie. – 2016. – No. 6. – P. 28. – ISSN 2223-5167.
- 3 **Isaev, A. G.** Ensuring acoustic safety during ball-and-rod hardening, taking into account the achievement of the specified quality parameters of the surface layer (for example, flat parts) : dissertation for the degree of candidate of technical sciences : 05.26.01, 05.02.08 / Isaev Alexander Genadievich. – Rostov-on-Don, 2017. – 129 с.
- 4 Robotic hammer peening-induced martensite in austenitic steels: Spatial distributions of plastic deformation and phase transformation / H. Liu, Ch. K. Ivan Tan, Yu. Wei [et al.] // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 87. – P. 297–301. – DOI 10.1016/j.procir.2020.02.033.
- 5 Laser-cladding and robotic hammer peening of stainless steel 431 on low alloy steel 4140 for surface enhancement and corrosion protections / H. Liu, Ch. K. I. Tan, X. Dong [et al.] // Journal of Adhesion Science and Technology. – 2022. –

– P. 2313–2327. – DOI 10.1080/01694243.2021.2011657.

6 Review on robot-assisted polishing : Status and future trends / X. Ke, Y. Yu, K. Li [et al.] // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2023. – Vol. 80. – P. 102482. – DOI 10.1016/j.rcim.2022.102482.

7 A review of surface quality control technology for robotic abrasive belt grinding of aero-engine blades / B. Zhang, Sh. Wu, D. Wang [et al.] // Measurement. – 2023. – Vol. 220. – P. 113381. – DOI 10.1016/j.measurement.2023.113381.

Vol. 36, No. 21. – P. 2313–2327. – DOI 10.1080/01694243.2021.2011657.

6 Review on robot-assisted polishing : Status and future trends / X. Ke, Y. Yu, K. Li [et al.] // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2023. – Vol. 80. – P. 102482. – DOI 10.1016/j.rcim.2022.102482.

7 A review of surface quality control technology for robotic abrasive belt grinding of aero-engine blades / B. Zhang, Sh. Wu, D. Wang [et al.] // Measurement. – 2023. – Vol. 220. – P. 113381. – DOI 10.1016/j.measurement.2023.113381.

*A. G. Isaev, E. V. Bivzyuk, I. M. Chukarina*

### IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE HARDENING PROCESS OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF TRANSPORT MACHINES

**Abstract.** The article examines the problem of improving the efficiency of the hardening process for welded rod structures of transport machines. The relevance of this research lies in the need to improve the quality and reliability of load-bearing structures while simultaneously ensuring safe working conditions. This paper describes a robotic system that can improve the efficiency of the hardening process for welded rod structures of transport machines. The proposed robotic system includes a device for clamping and rotating the workpiece to be hardened, an actuator module with a ball-and-rod hardener, and a process parameter control system. Algorithms for generating tool paths and selecting machining modes that ensure specified quality parameters have been developed. The practical significance of this work is confirmed by the implementation results: the automated system increases the fatigue life of structures by 40–50% compared to manual processing. Working conditions are significantly improved, vibration levels are reduced, and manual operations in the processing area are completely eliminated.

**Keywords:** ball-and-rod hardener, welded joint, robotic process system.

**For citation:** Isaev, A. G. Improving the efficiency of the hardening process of load-bearing structures of transport machines / A. G. Isaev, E. V. Bivzyuk, I. M. Chukarina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 176–181. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_176.

#### Сведения об авторах

##### **Исаев Александр Геннадьевич**

Донской государственный технический университет (ДГТУ),  
кафедра «Робототехника и мехатроника»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: isaev278@mail.ru

##### **Бивзюк Эмиль Витальевич**

Донской государственный технический университет (ДГТУ),  
кафедры «Робототехника и мехатроника»,  
преподаватель кафедры,  
e-mail: aemiliuslibertus@yandex.ru

##### **Чукарина Ирина Михайловна**

Донской государственный технический университет (ДГТУ),  
кафедра «Технология машиностроения»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: chukarinaim@mail.ru

#### Information about the authors

##### **Isaev Alexander Gennadievich**

Don State Technical University (DSTU),  
Chair “Robotics and Mechatronics”,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: isaev278@mail.ru

##### **Bivzyuk Emil Vitalievich**

Don State Technical University (DSTU),  
Chair “Robotics and Mechatronics”,  
Lecturer of the Chair,  
e-mail: aemiliuslibertus@yandex.ru

##### **Chukarina Irina Mikhailovna**

Don State Technical University (DSTU),  
Chair “Mechanical Engineering Technology”,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: chukarinaim@mail.ru

*С. В. Кротов*

### ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ «КОЛЕСО – РЕЛЬС» ПРИ ТЯЖЕЛОВЕСНОМ ДВИЖЕНИИ

**Аннотация.** Модель колесной пары адаптирована к рассмотрению конкретной точки контакта колеса с рельсом. Рассмотрен конформный профиль колеса по отношению к новому рельсу. Данный профиль представляется наиболее рациональным вследствие максимально приближенного к идеальным условиям эксплуатации. Модель имитирует свободное качение колеса по рельсу при наличии вертикальной нагрузки, т.е. по прямой. Методология исследования базируется на численном моделировании с применением программного комплекса.

Исследованы особенности функционирования системы «колесо – рельс» в условиях тяжеловесного движения: оценивалось напряженно-деформированное состояние зоны контакта при сверхнормативных нагрузках. Осевая нагрузка варьировалась от 25 до 40 т на ось. Научная новизна заключается в проведении численного моделирования в среде ANSYS с учетом особенностей взаимодействия поверхностей.

В результате моделирования получены количественные данные о распределении различных типов напряжений в зоне контакта и определены геометрические размеры пятна контакта. Оценены зоны скольжения внутри контактной площадки. Достоверность результатов подтверждена сходимостью с теоретическими формулами классической механики контакта. Полученные закономерности позволяют прогнозировать износ и контактную усталость рельсов и колес при тяжеловесном движении.

**Ключевые слова:** колесная пара, осевая нагрузка, метод конечных элементов, напряжения и деформации, скольжение, несущая способность.

**Для цитирования:** Кротов, С. В. Особенности работы системы «колесо – рельс» при тяжеловесном движении / С. В. Кротов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 182–194. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_182.

#### **Введение**

В «Стратегии развития холдинга „РЖД”» на период до 2030 года определен один из основных векторов развития железнодорожного транспорта: «Тяжеловесное движение и повышение весовых норм грузовых поездов – один из основных способов оптимизации перевозочного процесса, позволяющих увеличить провозную способность участков и направлений, производительность локомотивов и локомотивных бригад, сократить потребление энергоресурсов на тягу поездов» [1]. Для решения данной задачи следует рассматривать преимущества тяжеловесного движения по отношению, например, к использованию длинносоставных поездов с целью улучшения перевозочного процесса. Оба способа используются для доставки наибольшего количества груза за наименьший промежуток времени, это и называется оптимизацией перевозочного процесса.

Одним из критериев Международной ассоциации тяжеловесных перевозок является железная дорога, где эксплуатируются вагоны с осевой нагрузкой 27 т и выше или планируется эксплуатировать ее с такой осевой нагрузкой. Эта организация распространяет технические знания и опыт с целью внедрения тяжеловесного движения [2, 3].

Некоторые основные направления и цели для России выглядят следующим образом. Главным фактором развития признано повышение нагрузки на ось вагона. В настоящее время в России средняя нагрузка на ось составляет 21 тс при своём пределе в 23,5 тс на большей части сети, при наличии нагрузки 25 т/ось. Это невысокий показатель по сравнению с ведущими странами. Например, в Австралии и ЮАР пассажирское и грузовое движение разделяется, в России совмещается пассажирское и грузовое движение. Необходимы мероприятия по разделению видов движения.

Вполне возможно использование сочлененных поездов. В состав поезда входят исключительно вагоны сочлененного типа, с целью сокращения промежутков между вагонами [2]. Вес поезда из полувагонов сочлененного типа составит не обычные 6 300 т, а почти 9 000 т. Таким образом, точнее реализуется осевая нагрузка и грузоподъемность вагонов. Две сотни вагонов уже есть в эксплуатации.

В статье [3] рассматриваются перспективы развития тяжеловесного движения: «...необходимо контролировать напряженное состояние системы «экипаж – путь»; принять к сведению, что осевая нагрузка 40 т и более технически возможна; взаимодействующие элементы колесо и рельс при тяжеловесном движении следует рассматривать как систему» и многие другие.

Важнейшая проблема действия высоких нагрузок на ось – увеличенный выход из строя рельсов в месте сварных стыков. Специалисты американского Центра транспортных технологий представили концепцию системы «колесо – рельс». Новый подход позволяет фиксировать участки, на которых динамические нагрузки становятся критическими и выходят за пределы расчетной прочности инфраструктуры [4].

### Основная часть

Рассмотрим диаграмму повреждаемости колес железных дорог США за пятьдесят лет (рис. 1) [5]. Износ гребня, в нашей терминологии «подрез гребня» и «тонкий гребень», занимает в количественном выражении первую позицию. Это продукт действия высоких горизонтальных нагрузок. Однако на второй диаграмме явным лидером становится дефект колеса «разрушение обода» или «откол обода» в российской квалификации; он в разы превосходит даже такой опасный дефект, как разрушение (трещина) диска, и тем более все остальные. Дефект «разрушение диска» автор также относит к последствиям введения тяжеловесного движения, высокой вертикальной нагрузки. В настоящее время осевая нагрузка в США составляет оптимальное, по мнению специалистов, значение 32,5 т [5].

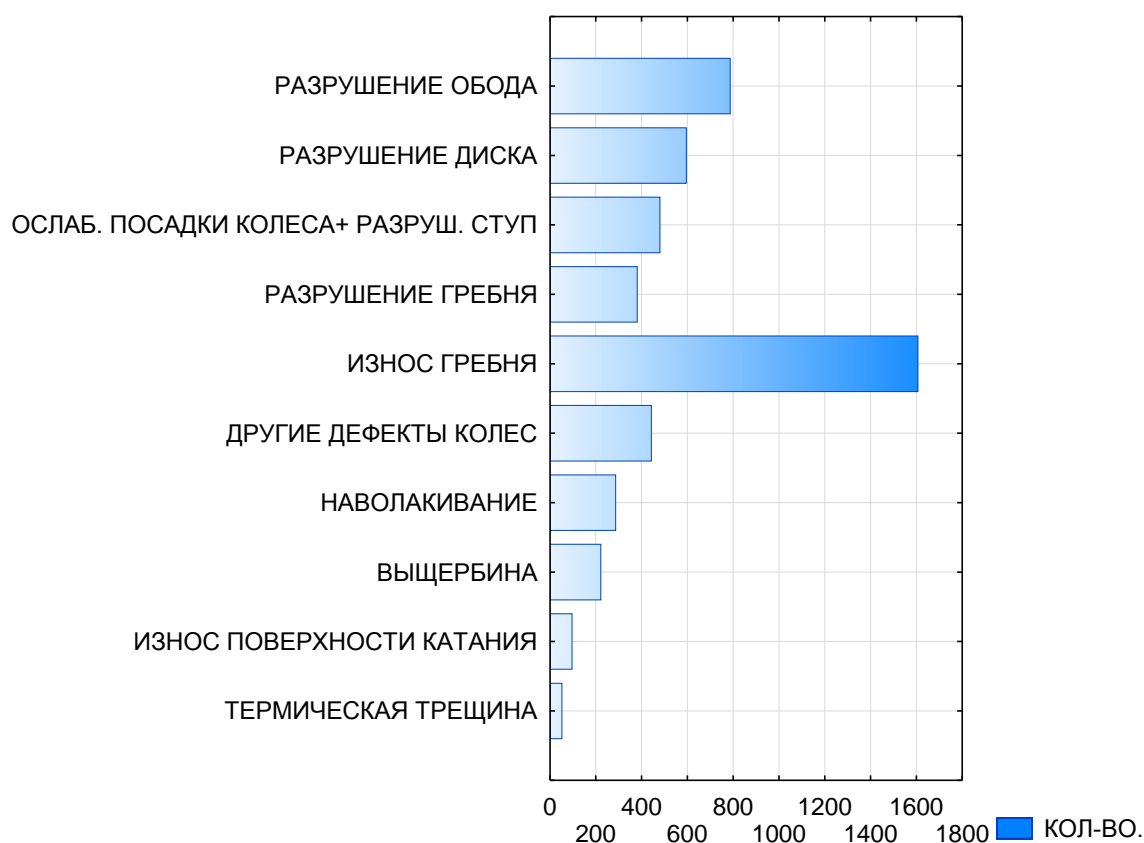


Рис. 1. Столбчатая диаграмма повреждаемости колес за период 1975–2025 гг.

На рис. 1 видно, что повреждаемость колес и колесных пар дефектами, связанными с высокой осевой нагрузкой, занимают ведущие позиции, о чем говорят диаграммы на рис. 2 и 3. Такие дефекты колеса, как разрушение диска, обода и гребня вместе с опаснейшим дефектом сдвиг (ослабление посадки) колеса, нанесли совокупный ущерб более чем на полмиллиарда долл. в течение пятидесяти лет, когда нагрузка на ось росла в пределах 29–35 т на ось (а в некоторых странах и выше). На диаграммах не отображены десятки случаев, в которых пострадали люди, иногда с фатальными последствиями.

Таким образом, наряду с очевидными положительными показателями, такими как увеличение грузоподъемности, увеличение перевозимого количества груза, получение дополнительной прибыли, улучшение других экономических показателей, тяжеловесное движение с ростом осевых нагрузок влечет за собой также и увеличение повреждаемости колес и колесных пар.



Рис. 2. Заявленный ущерб от дефектов колес, %

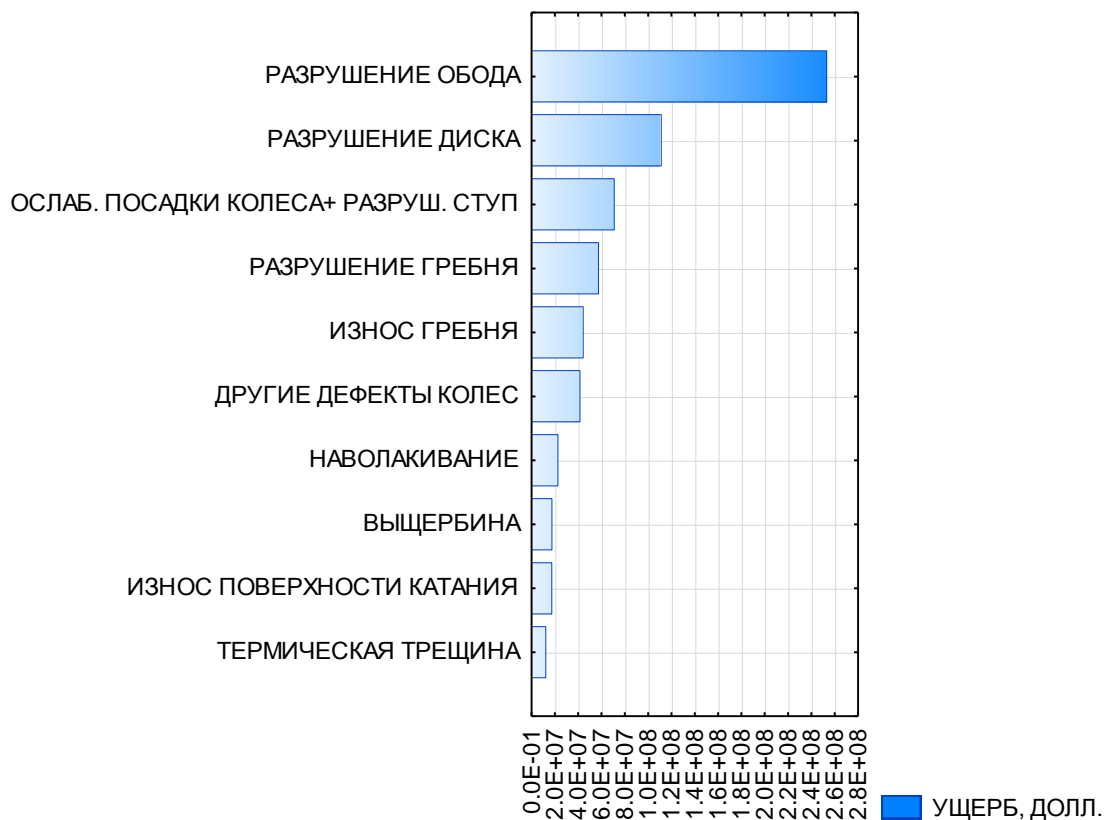


Рис. 3. Заявленный ущерб от дефектов колес, долл.

Рост осевых нагрузок неизбежно влечет за собой увеличение механических напряжений в зоне контакта колеса и рельса, а также в подрельсовом основании. Следовательно, одним из основных факторов, ограничивающих рост осевых нагрузок, являются максимальные механические напряжения (эквивалентные, нормальные и касательные) в системе «колесо – рельс». Количественные параметры взаимодействия рельса и колеса во многом зависят от основных технико-экономических показателей путевого хозяйства и подвижного состава, включая интенсивность износа рельсов, развитие контактно-усталостных дефектов, гарантированную грузоподъемность, и влияют на безопасность движения [6].

В данной работе представлена математическая модель контактного взаимодействия колеса и рельса в среде конечно-элементного моделирования ANSYS [7]. Выполнено моделирование различных режимов состояния контакта колеса и рельса при изменяемых значениях осевых нагрузок, в том числе с учетом различных коэффициентов трения в зоне контакта. Кроме того, выполнены расчеты контактных напряжений для современных профилей колеса и рельса, причем рассмотрена картина профиля приработанного колеса и нового рельса, а также дана качественная и количественная характеристика состояния контактирующих тел в зоне контакта при различных сочетаниях исходных данных.

На основании результатов исследования подготовлено заключение о напряженно-деформированном состоянии рельса и колеса. В частности, учитывалось влияние различных сил трения в зоне контакта, получены зависимости изменения нормальных напряжений на поверхности рельса при взаимодействии с колесами подвижного состава от величин осевой нагрузки и режима контакта для прогнозирования состояния рельсовой и колесной стали.

#### *Описание конечно-элементной модели*

Колесо контактирует с головкой рельса на определенной площадке. Величины и закон распределения напряжений по площадке контакта зависят от динамической нагрузки колеса, соотношения нормальной и касательной составляющих вектора нагрузки колеса, формы контактирующих поверхностей и т.д.

Впервые решение основных задач о контактных напряжениях и деформациях было получено на основе методов теории упругости в 1881–1882 гг. Г. Герцем [8]. На основе нормальной задачи Герца максимальное контактное напряжение  $P_{\max}$  можно рассчитать по формуле

$$P_{\max} = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{1,5FE_{\text{пр}}^2}{R_{\text{пр}}^2}},$$

где  $F$  – сила нормальной нагрузки колеса и рельса;  $E_{\text{пр}}$  – приведенный модуль упругости;  $R_{\text{пр}}$  – приведенный радиус, зависящий от характерных радиусов взаимодействия колеса и рельса в точке контакта.

Следует иметь в виду, что контактная теория Герца справедлива при следующих предположениях: контактные поверхности однородны и изотропны; силы трения в зоне контакта отсутствуют; размер области контакта мал по сравнению с размерами контактирующих тел и характерными радиусами кривизны недеформированных поверхностей; для контактной задачи используется решение линейно-упругого полупространства, контактные поверхности гладкие.

При движении экипажа положение колёсной пары относительно рельсов существенно меняется, что приводит к различным сочетаниям зон контакта колеса и рельса. Даже при постоянной осевой нагрузке нормальные напряжения будут изменяться из-за различий в радиусах кривизны контактных поверхностей этих зон. При наличии одного радиуса кривизны поверхности в зоне контакта можно использовать решение Герца. При наличии двух и более радиусов кривизны в зоне контакта для определения площади контакта следует использовать «негерцевские» решения. Это принципиально важно при решении задачи о напряжённо-деформированном состоянии контакта изношенных колёс и рельсов, а также при наличии бокового контакта.

Классические методы расчёта, несмотря на повышение точности методов, способны решать задачи лишь при их значительной идеализации, заменяя реальную конструкцию её расчётной схемой. Современные методы численного моделирования позволяют решать подобные задачи с достаточной точностью в среде конечно-элементного моделирования, учитывая в том числе дополнительные силы трения между контактирующими поверхностями [9].

Для анализа распределения напряжений в зоне контакта колеса и рельса выполнена трехмерная модель взаимодействия изношенного колеса и нового рельса с полным геометрическим подобием натуральных колеса и рельса. На основе трёхмерных геометрических моделей построены конечно-элементные модели (МКЭ) взаимодействия колеса с рельсом. В области контакта сетка элементов имеет повышенную частоту (размер элемента составляет до 1 мм) для максимально точного отображения результатов анализа.

Экспериментально установлено, что для конкретной задачи дальнейшее уменьшение размера сетки не приводит к повышению точности результатов, а лишь увеличивает время решения системы дифференциальных уравнений.

Граничные условия и нагружение:

- рельс жестко заземлен;
- одноточечный контакт колеса и оси, деформация вертикальная;
- элементы модели колеса и рельса не могут перемещаться по горизонтали;
- вертикальная сила прикладывается дистанционно (remote force), что позволяет максимально точно имитировать воздействие осевой нагрузки, не используя модель оси и прессового соединения колеса и оси, тем самым ускоряя расчет. При этом сохраняется достаточное приближение к действительному физическому процессу, происходящему при контакте.

Основные параметры расчетной схемы: колесо вагона диаметром 950 мм; осевая нагрузка составляет 25; 27; 29; 31; 33; 35; 37 и 40 тс/ось; коэффициент трения меняется в диапазоне 0,16–0,3; колесо и рельс вертикальны; контактные поверхности соответствуют заданным профилям.

Исследовалось напряжённо-деформированное состояние колеса и рельса при различных режимах нагружения: учитывались силы трения между контактирующими поверхностями и вертикальная нагрузка. Геометрическая модель контактной пары «колесо – рельс», соответствующая диску колеса А4 железных дорог РФ и рельсу Р60, представлена на рис. 4, где при этом поверхности контакта являются конформными и имеют одну точку контакта. Область контакта колеса и рельса показана на рис. 5. Значение силы трения зависит от осевой нагрузки и коэффициента трения.

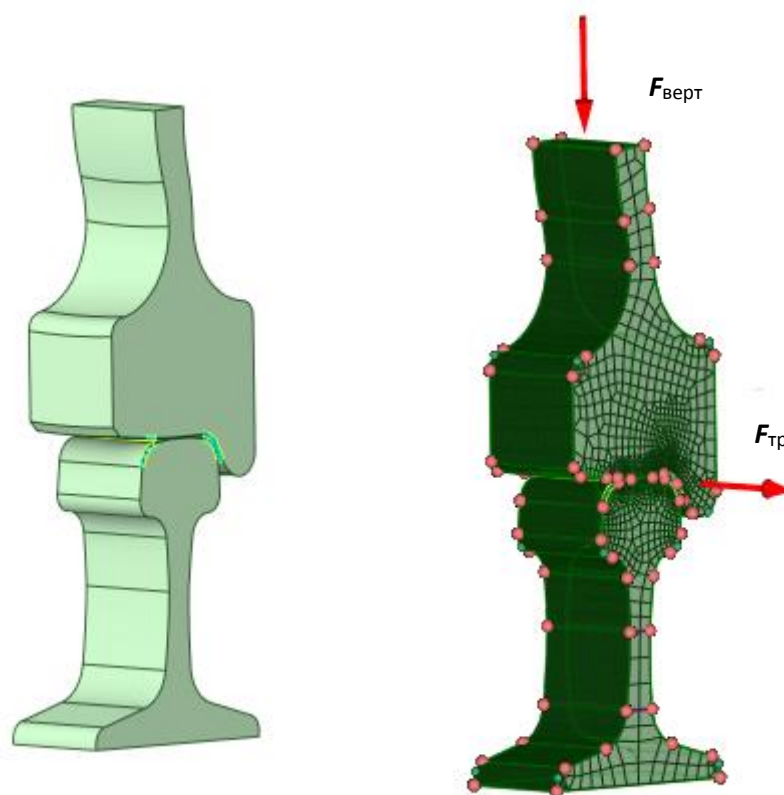


Рис. 4. 3D-модель контакта и схема приложения нагрузок  
( $F_{\text{верт}}$  – осевая нагрузка;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения при контакте колеса с рельсом)

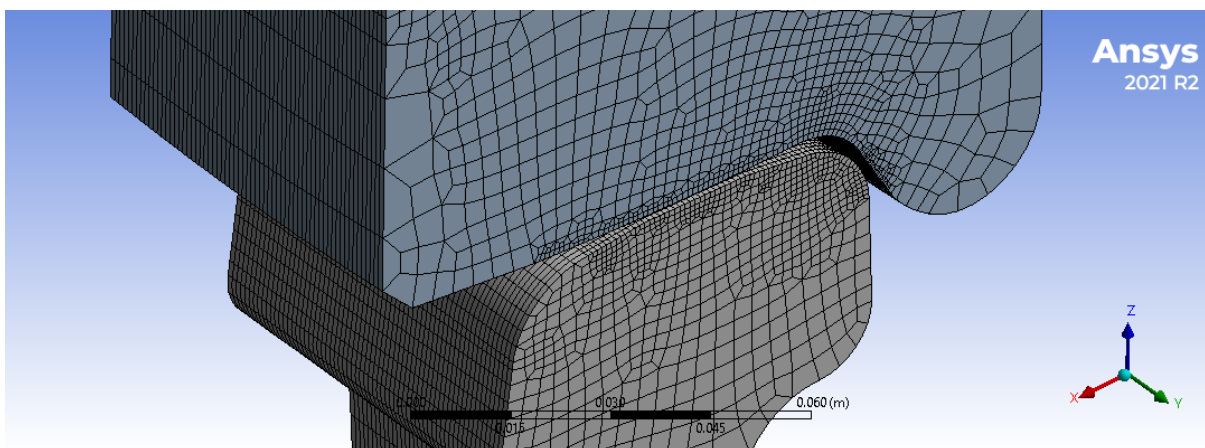


Рис. 5. Область контакта колеса и рельса

### Анализ результатов расчета

В ходе симулирования получены эквивалентные напряжения в колесе и рельсе (рис. 6).

На рис. 7 распространение эквивалентных напряжений представлено в виде ограничивающей поверхности, определяющей распространение этого параметра по глубине контактирующих тел в виде объемного тела.

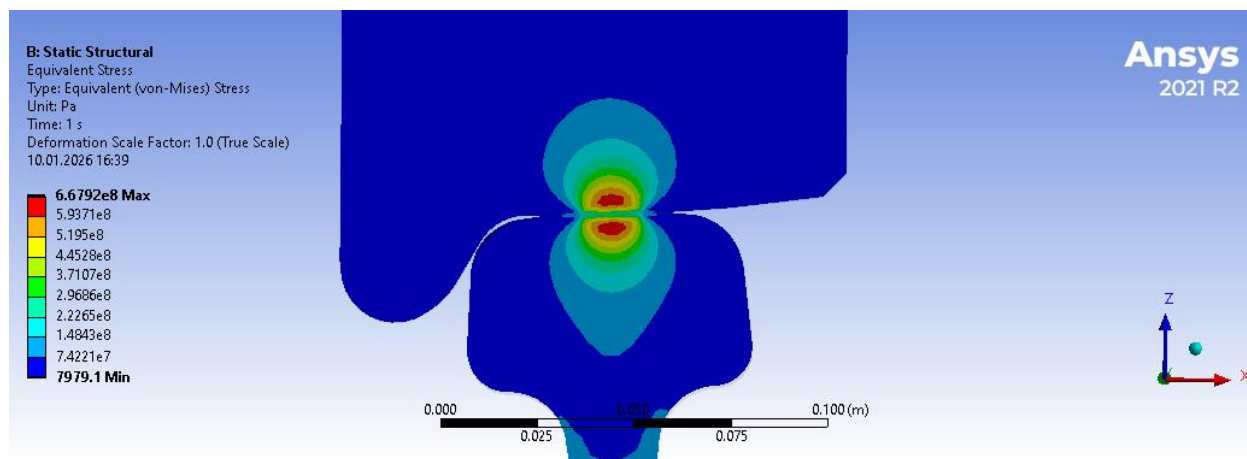


Рис. 6. Эквивалентные напряжения в зоне контакта колеса и рельса при осевой нагрузке 25 т/ось

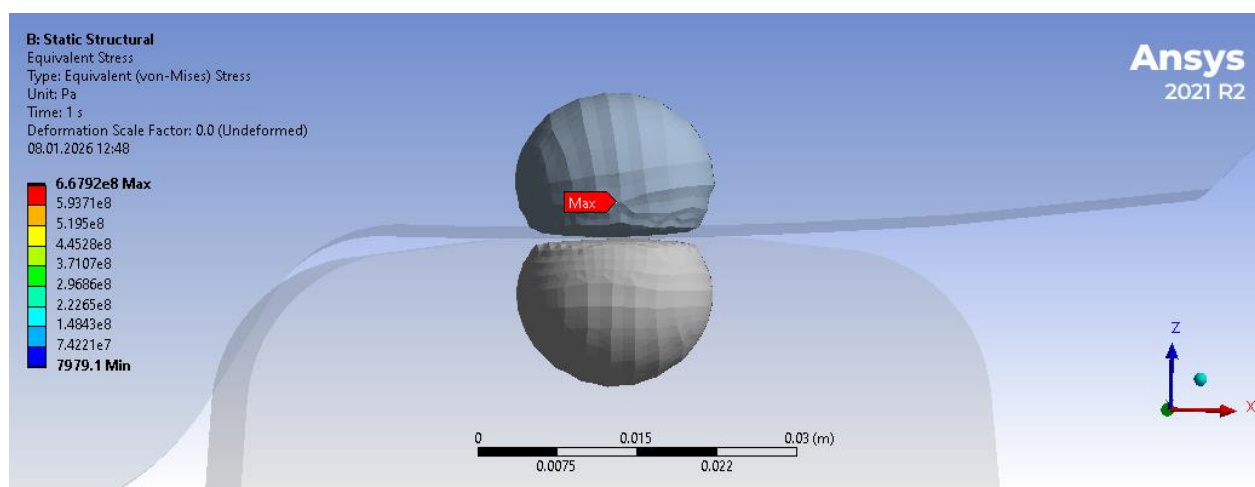


Рис. 7. Область распространения эквивалентных напряжений (показана ограничивающая поверхность)

Для примерных расчетов используем формулу [9]

$$F = \frac{3P}{2\pi ab},$$

где  $a = b = 0,0075$  м – оси эллиптической площадки контакта;  $P = 122500$  Н – нагрузка на колесо, соответствует осевой нагрузке 25 т/ось [12], тогда

$$F = \frac{3 \cdot 122500}{2\pi \cdot 0,0075 \cdot 0,0075} = 1040339703 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \approx 1040 \text{ МПа}.$$

Такое соотношение радиусов пятна контакта встречается при одинаковом износе колеса и рельса либо при изношенном колесе ( $r_1 = 510$  мм) и новом рельсе ( $r = 500$  мм).

Вычислим контактное давление по более точным формулам, применявшимся известными исследователями.

Приведенный модуль упругости для материала колеса и рельса

$$E_{\text{пр}} = \frac{E}{2(1-\mu^2)}.$$

Коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ , модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа, тогда

$$E_{\text{пр}} = \frac{210000}{2(1-0,3^2)} = 115385 \text{ МПа}.$$

Параметры контакта – сумма показателей кривизны поверхностей в точке контакта

$$\sum \rho = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{1}{510} + \frac{1}{500} = 0,0039608 \text{ мм}^{-1}.$$

В методике, применяемой во ВНИИЖТе и РГУПСе для определения максимальных давлений, используются коэффициенты  $m$  и  $n$ , зависящие от соотношения радиусов [9–11].

Вспомогательный параметр

$$\cos \alpha = \frac{\left| \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right|}{\sum \rho} = \frac{|0,0019608 - 0,002|}{0,0039608} \approx 0,99.$$

При таком значении  $\cos \alpha$  параметры  $m = 1,01$  и  $n = 0,99$  можно принять равными 1 согласно [9] и пятно контакта представляет из себя круг. Для практически кругового контакта максимальное давление согласно [10, 11]

$$P_{\text{max}} = 0,388^3 \sqrt{P \cdot (\sum \rho \cdot E_{\text{пр}})^2},$$

Тогда

$$P_{\text{max}} = 0,388^3 \sqrt{122500 \cdot (0,0039608 \cdot 115385)^2} \approx 1055 \text{ Н/м}^2.$$

В расчетном комплексе ANSYS получено значение 1032 МПа (рис. 8). Расхождение составляет 2 %. Результаты представлены в виде распределений напряжений на поверхности колеса и рельса (МПа) при различных осевых нагрузках с учетом силы трения.

Количество узлов составляет 46195 при 113992 элементах. Из них 7624 элементов моделирования контакта CONTA и 106368 элементов моделирования твердых тел SOLID.

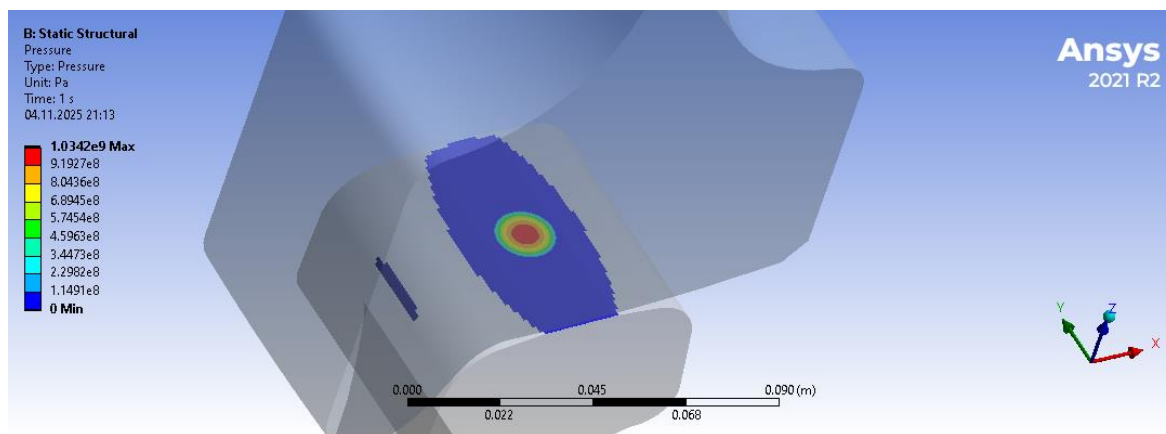


Рис. 8. Распределение контактного давления

Величина зоны наиболее высокого контактного давления составляет 7,5 мм. Диаметр пятна контакта равен 15 мм. Данная форма пятна контакта оптимальна. В случае эллиптического контакта, например, при осях эллипса  $a = 0,005$  м и  $b = 0,01$  м контактное давление при тех же условиях нагружения достигает  $P = 1169$  МПа; расчеты сопоставимы с данными, полученными в [9].

Знание размеров площадки контакта и величины удельного давления  $P_0$  позволяет вычислить напряжения в контактирующих телах. Наибольший практический интерес представляют напряжения в точках оси  $z$  по глубине соприкасающихся тел. Из соотношений главных касательных напряжений, равных полуразностям трех главных напряжений в зависимости от соотношения размеров полуосей контактного эллипса, следует, что наибольшее касательное напряжение [6]

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = 0,325P_0.$$

Здесь  $P_0 = 1032,9$  МПа, тогда

$$\tau_{\max} = 0,325 \cdot 1032,9 \approx 336 \text{ МПа}.$$

В то же время полученные расчетным комплексом ANSYS максимальные касательные напряжения оказались равными  $\tau_{\max} = 337,1$  МПа, что совпадает с аналитическим результатом (рис. 9).

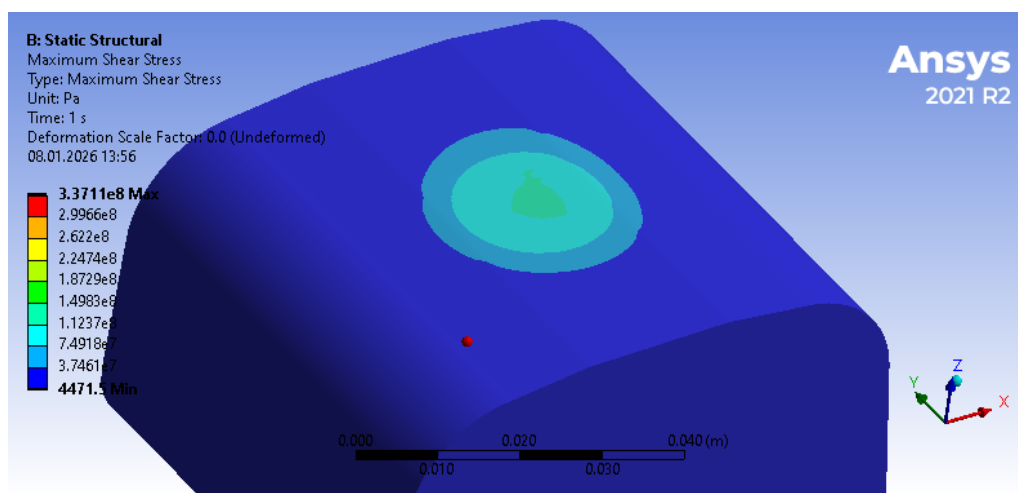
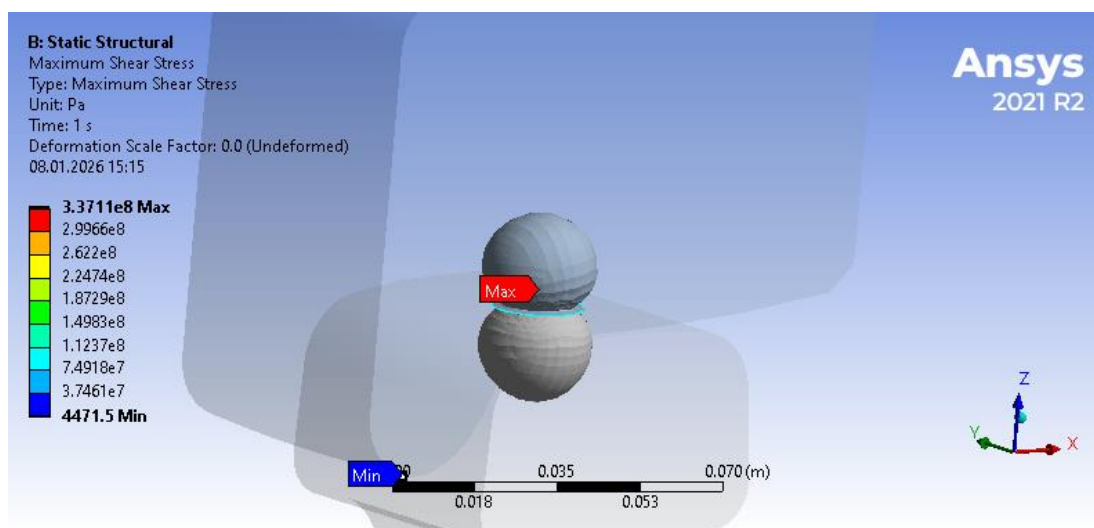


Рис. 9. Максимальные касательные напряжения

На рис. 10 распространение максимальных касательных напряжений представлено в виде совокупности точек поверхности, определяющих распространение этого параметра по глубине контактирующих тел (Capped Isosurfaces).

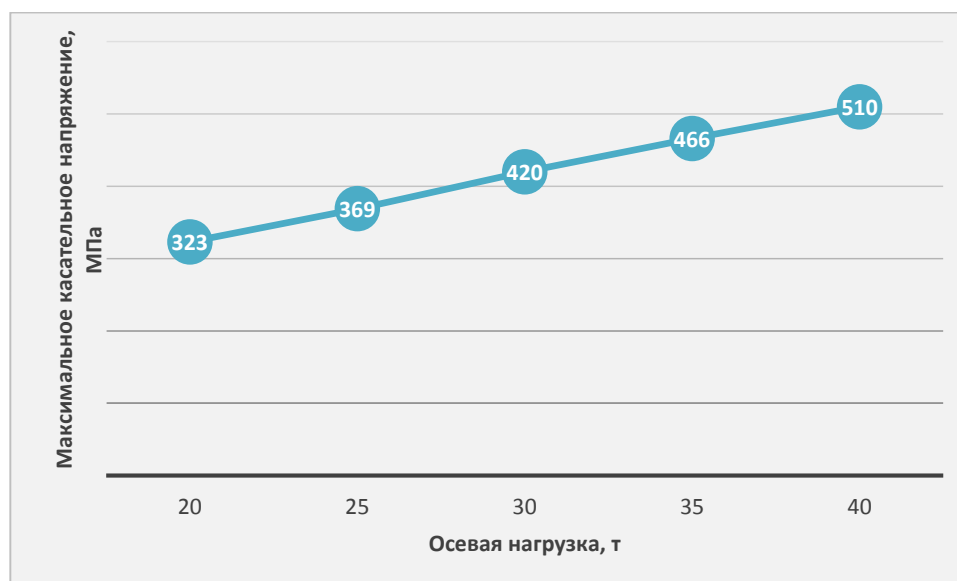


**Рис. 10. Область распространения максимальных касательных напряжений**

Следовательно, показанные области являются критическими для объема действия максимальных касательных напряжений. Максимальное значение располагается на расстоянии  $c = 0,31a$  от поверхности, т.е.  $c = 0,31 \cdot 7,5 = 2,35$  мм [12], и незначительно зависит от соотношения полуосей эллипса пятна контакта, соотношение размеров которых в данном случае составляет 1.

Определение величины  $\tau_{\max}$  требуется для прогнозирования наступления опасного состояния в контактирующих телах, так как при всестороннем сжатии разрушение может начаться вследствие сдвиговых деформаций [13, 14].

Приведем результаты расчетов максимальных касательных напряжений при различной осевой нагрузке. На рис. 11 представлены зависимости максимальных касательных напряжений (МПа) в зависимости от осевой нагрузки грузового вагона (т/ось).



**Рис. 11. Максимальные касательные напряжения в зависимости от осевой нагрузки**

Обращает на себя внимание тот факт, что при осевой нагрузке 30 т/ось максимальные касательные напряжения даже при конформном контакте превосходят предел текучести колесной стали на сдвиг.

На поверхности контакта касательные напряжения значительно ниже и составляют величину  $\tau_{xy} = 113$  МПа (рис. 12).

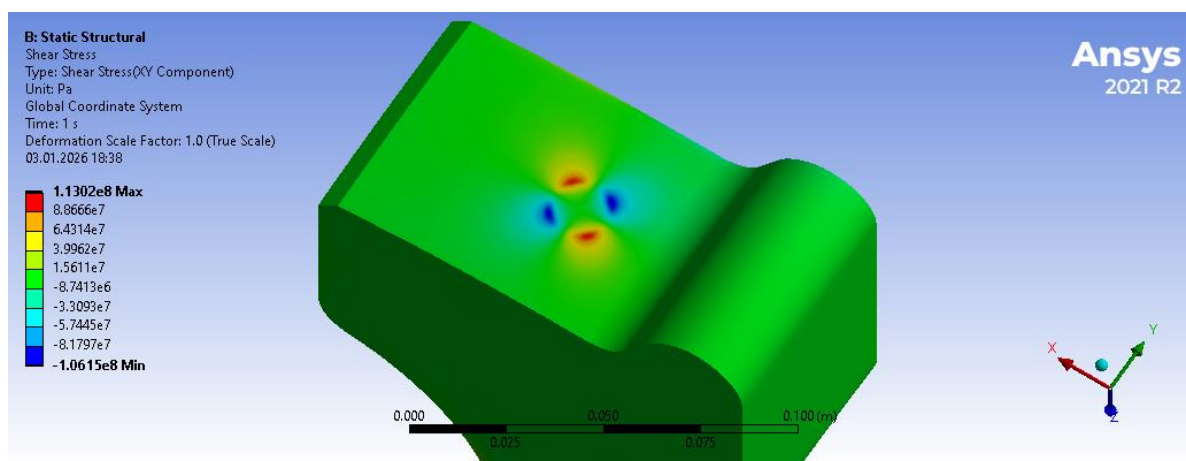


Рис. 12. Касательные напряжения на поверхности контакта

Скольжение присутствует в зоне контакта даже только при вертикальной нагрузке и зависит от геометрии контакта. В данном случае этот параметр, который значительно влияет на сдвиговые характеристики материала колеса и рельса в зоне контакта, составляет незначительную величину (рис. 13).

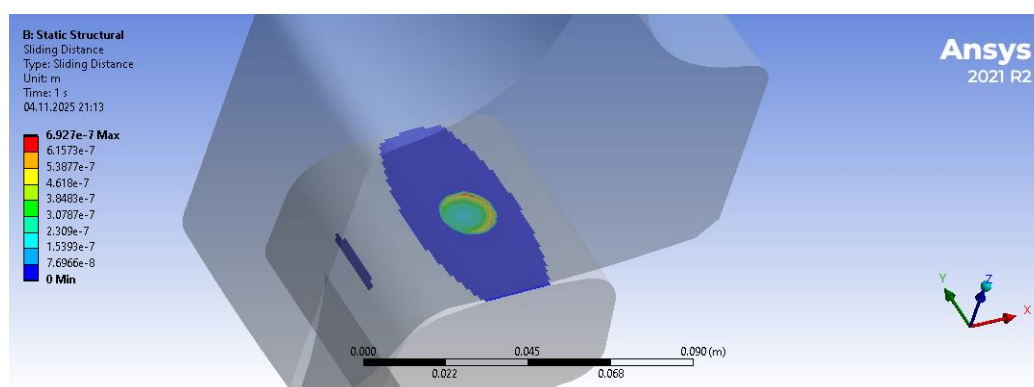


Рис. 13. Скольжение в зоне контакта колеса и рельса

Скольжение при тех же условиях контакта, но при возрастающей вертикальной осевой нагрузке 30 т/ось представлено на рис. 14.

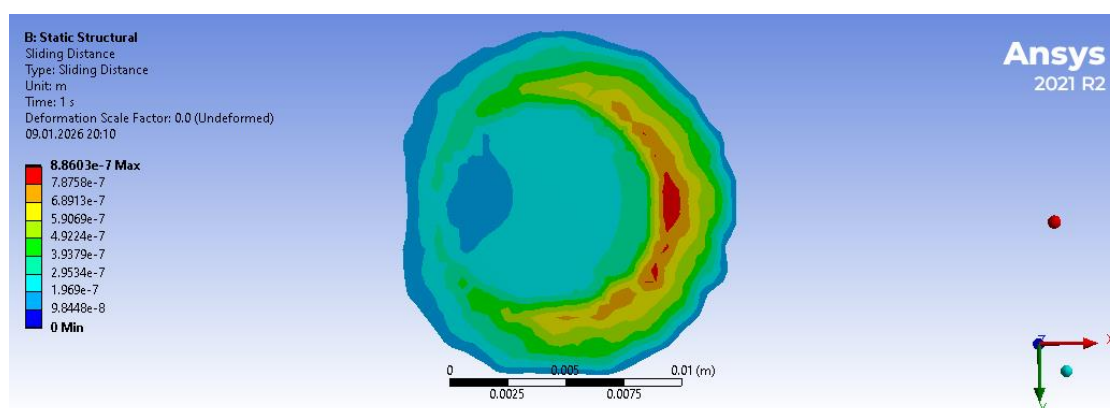
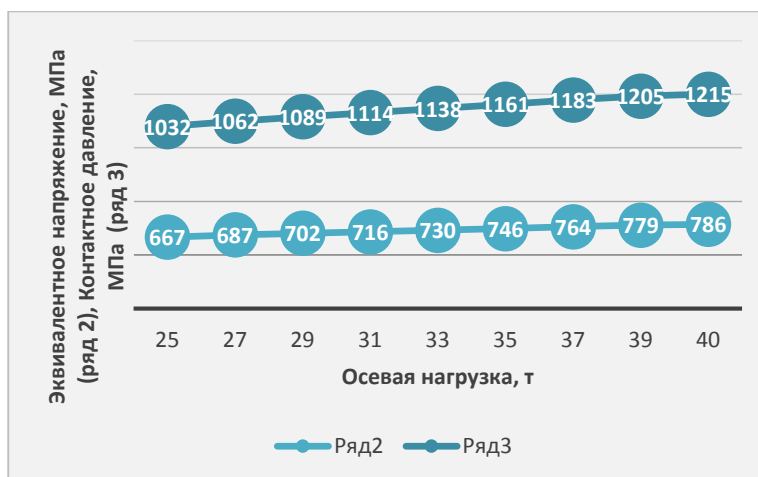


Рис. 14. Скольжение при повышенной осевой нагрузке 30 т/ось

Наличие зоны скольжения в пятне контакта колеса и рельса (крип, или микропроскальзывание) является естественным процессом, однако при определенных условиях скольжение влияет на несущую способность колесной пары: интенсивный износ вследствие повышенного трения; термические повреждения вследствие выделения тепла; снижение сцепления; повышение вибрации и шума; с точки зрения напряженно-деформированного состояния – рост касательных напряжений, которые могут превысить предел выносливости [15–17]. Поэтому данный параметр требует повышенного внимания в инженерных расчетах контакта колеса и рельса.

На рис. 15 представлены зависимости эквивалентных напряжений, МПа (ряд 2) и контактных давлений, МПа (ряд 3) в зависимости от осевой нагрузки грузового вагона (т/ось).



**Рис. 15. Контактные давления (ряд 2) и эквивалентные напряжения (ряд 3) в зависимости от осевой нагрузки**

### Выводы

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) пары «изношенное колесо – новый рельс» в ANSYS Workbench позволяет решать критические задачи безопасности и ресурса подвижного состава, которые невозможно оценить с помощью стандартных аналитических методов (например, по теории Герца) из-за несовпадения геометрий.

Основные преимущества и цели такого анализа:

- *оценка изменения пятна контакта* – износ колеса превращает расчетное эллиптическое пятно контакта в сложное неэллиптическое. ANSYS позволяет точно определить его форму и фактическую площадь, что критично для расчета удельных давлений;

- *выявление зон критических напряжений* – моделирование показывает рост главных напряжений и напряжений сдвига в зонах, где профиль изношенного колеса (например, при наличии подреза гребня) контактирует с головкой нового рельса. Это помогает предсказать появление трещин и усталостное выкрашивание;

- *прогноз ресурса и износа* – на основе данных НДС рассчитывается коэффициент долговечности и количество циклов до разрушения. Это позволяет оптимизировать графики технического обслуживания и обточки колесных пар;

- *оценка риска схода* – анализ контакта в зоне гребня изношенного колеса позволяет оценить боковые силы и устойчивость колесной пары, что напрямую влияет на безопасность движения;

- *учет пластических деформаций* – в отличие от упрощенных моделей ANSYS позволяет учитывать упругопластические свойства материалов, что важно при высоких осевых нагрузках, характерных для современного тяжеловесного движения;

- *оптимизация профилей* – результаты моделирования можно использовать для разработки рациональных профилей колес, которые обеспечивали бы более равномерное распределение нагрузки при контакте с рельсами.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и эксплуатации железнодорожного пути и подвижного состава в условиях тяжеловесного движения для повышения надежности и долговечности элементов системы «колесо – рельс».

### Список литературы

1 Об утверждении стратегии научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). – URL: [http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya\\_kniga.pdf](http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf) (дата обращения: 11.01.2026).

### References

1 On approval of the scientific and technical development strategy of the Russian Railways holding company for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Paper). – URL: [http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya\\_kniga.pdf](http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf) (date of access: 11.01.2026).

- 2 **Бороненко, Ю. П.** Стратегические задачи вагоностроителей в развитии тяжеловесного движения / Ю. П. Бороненко // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2013. – № 5(48). – С. 68-73. – ISSN 1994-831X.
- 3 **Захаров, С. М.** Развитие тяжеловесного движения в мире / С. М. Захаров, К. П. Шенфельд // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 4. – С. 9–18. – ISSN 2223-9731.
- 4 Основные причины повышенного износа рельсов и гребней колесных пар грузовых вагонов / Л. А. Мугинштейн, В. М. Богданов, А. В. Сухов, Ю. С. Ромен // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 7. – С. 43–51. – ISSN 0044-4448.
- 5 Повышение работоспособности колесных пар подвижного состава / О. С. Валинский, А. А. Воробьев, С. И. Губенко [и др.]. – Казань : Издательство «Бук», 2022. – 324 с. – ISBN 978-5-00118-870-4.
- 6 **Кротов, В. П.** Напряженно-деформированное состояние колесной пары вагона при повышении режимов нагружения / В. П. Кротов, С. В. Кротов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2002. – № 2. – С. 36–39. – ISSN 0201-727X.
- 7 ANSYS Rel. 11.0. Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench. SAS IP Inc. – Canonsburg, 2007. – 1110 p.
- 8 **Hertz, H.** Gesammelte Werke / H. Hertz. – Leipzig : Johann Ambrosius Barth, 1895. – Bd 1. – 41 p.
- 9 **Иваночкин, П. Г.** Механика подвижного состава : учебное пособие / П. Г. Иваночкин, А. А. Зарифьян, Е. А. Василькова. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – 146 с. – ISBN 978-5-88814-913-3.
- 10 **Вериго, М. Ф.** Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган ; под редакцией М. Ф. Вериго. – Москва : Транспорт, 1986. – 558 с.
- 11 **Шахунянц, Г. М.** Железнодорожный путь : учебник для вузов железнодорожного транспорта / Г. М. Шахунянц. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1987. – 479 с.
- 12 **Кротов, С. В.** Определение вертикальных динамических сил, действующих на колесо в контакте с рельсом / С. В. Кротов, Д. П. Кононов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 3 (44). – С. 70–76. – ISSN 1815-588X.
- 13 **Ekberg, A.** Fretting fatigue of railway axles – a review of prediction methods and a finite element model scheme / A. Ekberg // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit. – 2004, Vol. 218. – P. 299–316.
- 14 **Кротов, С. В.** Анализ зоны контакта железнодорожного колеса и рельса / С. В. Кротов, Д. П. Кононов // Известия Петербургского университета путей
- 2 **Boronenko, Yu. P.** Strategic tasks of wagon builders in the development of heavy-haul traffic / Yu. P. Boronenko // Transport of the Russian Federation. Journal of science, practice, economics. – 2013. – No. 5 (48). – P. 68–73. – ISSN 1994-831X.
- 3 **Zakharov, S. M.** Development of heavy-haul traffic in the world / S. M. Zakharov, K. P. Shenfeld // Russian railway science journal. – 2013. – No. 4. – P. 9–18. – ISSN 2223-9731.
- 4 Main causes of increased wear of rails and wheelset flanges of freight cars / L. A. Muginshtein, V. M. Bogdanov, A. V. Sukhov, Yu. S. Romen // Railway Transport. – 2020. – No. 7. – P. 43–51. – ISSN 0044-4448.
- 5 Improving the performance of rolling stock wheelsets / O. S. Valinsky, A. A. Vorobyov, S. I. Gubenko [et al.]. – Kazan : Buk Publishing House, 2022. – 324 p. – ISBN 978-5-00118-870-4.
- 6 **Krotov, V. P.** Stress-strain state of a car wheelset with increasing loading conditions / V. P. Krotov, S. V. Krotov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2002. – No. 2. – P. 36–39. – ISSN 0201-727X.
- 7 ANSYS Rel. 11.0. Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench. SAS IP Inc. – Canonsburg, 2007. – 1110 p.
- 8 **Hertz, H.** Collected Works / H. Hertz. – Leipzig : Johann Ambrosius Barth, 1895. – Vol. 1. – 41 p.
- 9 Ivanochkin, P. G. Mechanics of rolling stock : a textbook / P. G. Ivanochkin, A. A. Zarifyan, E. A. Vasilkova. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – 146 p. – ISBN 978-5-88814-913-3.
- 10 **Verigo, M. F.** Interaction of track and rolling stock / M. F. Verigo, A. Ya. Kogan ; Ed. M. F. Verigo. – Moscow : Transport, 1986. – 558 p.
- 11 **Shakhunyants, G. M.** Railroad track : a textbook for universities of railway transport / G. M. Shakhunyants. – 3rd ed., revised and enlarged. – Moscow : Transport, 1987. – 479 p.
- 12 **Krotov, S. V.** Determination of vertical dynamic forces acting on a wheel in contact with a rail / S. V. Krotov, D. P. Kononov // Proceedings of Petersburg transport university. – 2015. – No. 3 (44). – P. 70–76. – ISSN 1815-588X.
- 13 **Ekberg, A.** Fretting fatigue of railway axles – a review of prediction methods and a finite element model scheme / A. Ekberg // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit. – 2004, Vol. 218. – P. 299–316.
- 14 **Krotov, S. V.** Analysis of the contact zone of a railway wheel and a rail / S. V. Krotov, D. P. Kononov // Proceedings of Petersburg

сообщения. – 2022. – Т. 19, № 2. – С. 221–231. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-19-2-221-231.

15 **Кротов, С. В.** Классификация параметров несущей способности прессового соединения колесной пары железнодорожного транспортного средства / С. В. Кротов, В. П. Кротов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2007. – № 2 (26). – С. 22–28. – ISSN 0201-727X.

16 **Кротов, С. В.** Факторный анализ расчета несущей способности колесной пары вагона / С. В. Кротов, А. Сладковски // Транспорт Урала. – 2012. – № 2 (33). – С. 36–40. – ISSN 1815-9400.

17 **Krotov, S.** Application of the discriminant analysis in research of bearing ability of the wheel pair of the car / S. Krotov, V. Krotov // Transport Problems. – 2011. – Vol. 6, No. 1. – P. 43–48. – EDN VATMRP.

transport university. – 2022. – Vol. 19, No. 2. – P. 221–231. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-19-2-221-231.

15 **Krotov, S. V.** Classification of the parameters of the bearing capacity of a press joint of a wheelset of a railway vehicle / S. V. Krotov, V. P. Krotov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2007. – No. 2 (26). – P. 22–28. – ISSN 0201-727X.

16 **Krotov, S. V.** Factor analysis of calculating the bearing capacity of a wagon wheel pair / S. V. Krotov, A. Sladkovsky // Transport of the Urals. – 2012. – No. 2 (33). – P. 36–40. – ISSN 1815-9400.

17 **Krotov, S.** Application of the discriminant analysis in research of bearing ability of the wheel pair of the car / S. Krotov, V. Krotov // Transport Problems. – 2011. – Vol. 6, No. 1. – P. 43–48. – EDN VATMRP.

*S. V. Krotov*

#### OPERATING FEATURES OF THE WHEEL-RAIL SYSTEM DURING HEAVY-HAUL TRAFFIC

**Abstract.** The wheelset model is adapted to consider a specific point of contact between the wheel and the rail. A conformal wheel profile relative to a new rail is considered. This profile is considered to be the most rational due to its closest approximation to ideal operating conditions. The model simulates free wheel rolling along the rail under a vertical load, i.e., in a straight line. The research methodology is based on numerical modeling using a software package.

The operating features of the wheel-rail system under heavy-haul traffic conditions are investigated: the stress-strain state of the contact zone under excessive loads is assessed. The axle load ranged from 25 to 40 tons per axle. The scientific innovation lies in the use of numerical modeling in the ANSYS environment, taking into account the specific features of surface interaction.

The modeling yielded quantitative data on the distribution of various stress types in the contact zone and determined the geometric dimensions of the contact patch. Sliding zones within the contact area were estimated. The reliability of the results was confirmed by their convergence with theoretical formulas of classical contact mechanics. The obtained patterns allow us to predict the wear and contact fatigue of rails and wheels during heavy-haul traffic.

**Keywords:** wheelset, axial load, finite element method, stresses and deformations, sliding, bearing capacity.

**For citation:** Krotov, S. V. Operating features of the wheel-rail system during heavy-haul traffic / S. V. Krotov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 182–194. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_182.

#### Сведения об авторах

##### **Кротов Сергей Викторович**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Строительная механика», кандидат технических наук, доцент, e-mail: SVK-19587@yandex.ru

#### Information about the authors

##### **Krotov Sergey Viktorovich**

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Construction Mechanics”, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: SVK-19587@yandex.ru

С. Ю. Лозовая, В. П. Воронов, В. М. Кравченко

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ РАБОЧИМ ОРГАНОМ С ИЗМЕНЯЕМОЙ КОМПОНОВКОЙ НОЖЕЙ \*

**Аннотация.** Рассмотрен процесс переработки резинотехнических изделий рабочим органом с изменяемой компоновкой ножей. Установлено, что для повышения стадийности измельчения наиболее эффективно использовать устройство с вертикальным расположением рабочего органа. Систематизированы сферы использования резиновой крошки: производство строительных материалов, компонентов для дорожного строительства, применение в качестве регенерата и др. Ввиду недостаточной изученности в целом вопросов измельчения эластомеров, например резины, и отсутствия устоявшихся теоретических подходов к данному процессу, целесообразно в математическом описании рассматривать разрушение резины в крошку с точки зрения ее вторичного использования в другом изделии. То есть рассматривать именно механизм получения крошки, а не процесс резания, характерный для механической обработки, целью которого является придание формы изделию. На основе геометрического и энергетического анализа произведено математическое описание зоны предразрушения перед фронтом зуба. Получено выражение коэффициента объемного расширения зоны уплотнения, определена минимальная частота вращения ротора, обеспечивающая эффективное отделение частицы. Установлено влияние технологических параметров (скорости вращения  $\omega$ , количества режущих ножей  $z$ , толщины регулировочного ножа  $z_b$ ) на мощность измельчения и морфологию частиц.

**Ключевые слова:** резинотехнические изделия, рабочий орган, эластомеры, вторичная переработка, зона уплотнения, коэффициент объемного расширения, работа деформации, мощность, математическое описание, изменяемая компоновка ножей.

**Для цитирования:** Лозовая, С. Ю. Математическое описание процесса переработки резинотехнических изделий рабочим органом с изменяемой компоновкой ножей / С. Ю. Лозовая, В. П. Воронов, В. М. Кравченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 195–202. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_195.

#### **Введение**

Ежегодно в мире образуются миллионы тонн резиновых отходов, основная масса которых направляется на полигоны для хранения, что приводит к долгосрочному загрязнению окружающей среды [1], в связи с чем проблема утилизации и переработки изношенных резинотехнических изделий вызывает повышенный интерес со стороны научного сообщества, прежде всего с экологической и экономической точки зрения. Одним из наиболее перспективных направлений переработки резинотехнических изделий является их измельчение механическим способом в устройстве с вертикальным рабочим органом для повышения стадийности измельчения [2]. В результате получается резиновая крошка, используемая в различных сферах, например в производстве строительных материалов (кровельные, бесшовные и плиточные покрытия, шумо- и гидроизоляция и др.), в качестве компонента для дорожного строительства, сорбента для очистки водоемов от нефтепродуктов и др. [3].

Эффективность процесса измельчения в значительной степени определяется физическими свойствами материала и взаимодействием режущего инструмента с ним. Несмотря на существование ряда эмпирических моделей эластомеров, вопрос математического описания связи параметров зоны уплотнения при внедрении зуба ножа, частоты его вращения и свойств резины практически не изучен. Поэтому теоретическое описание изменения материала при воздействии на него рабочего органа имеет важное прикладное значение для проектирования энергоэффективного оборудования с управляемым размером и формой конечного продукта – резиновой крошкой [4]. В основе математического описания лежит

---

\* Исследование выполнено в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

предположение о том, что резиновые изделия являются материалом измельчение которого сопровождается значительной объемной деформацией в области контакта с инструментом. Формирование зоны уплотнения (зоны предразрушения) является основным фактором, определяющим энергозатраты на измельчение, износ инструмента и, что особенно важно, форму и размер получаемых частиц.

### **Основная часть**

Для математического описания процесса измельчения резинотехнических изделий в крошку с целью их вторичного использования в качестве сырья для новых изделий рассматривается механизм разрушения материала. В отличие от механической обработки резанием, целью которой является придание формы изделию [5], в данном случае исследуется именно механизм образования резиновой крошки. При внедрении зуба инструмента в резиновый образец наблюдаются следующие этапы и особенности разрушения материала исследования [6, 7]:

1 Начальный этап характеризуется упругим поведением – при снятии нагрузки след от инструмента исчезает, а глубина внедрения линейно зависит от усилия до достижения предела упругости.

2 При превышении критической нагрузке наступает фаза необратимых изменений. В материале происходят сложные структурные преобразования.

3 Завершающая стадия – окончательное разрушение, при котором микронадрезы объединяются в единую трещину. Развитие этой трещины происходит вдоль режущей кромки, по сути формирует поверхность разрушения. Для резины характерно образование частиц (крошки) без пластической деформации – трещина точно следует траектории движения инструмента, таким образом образуется крошка «кубовидной» формы (рис. 1, *а*).

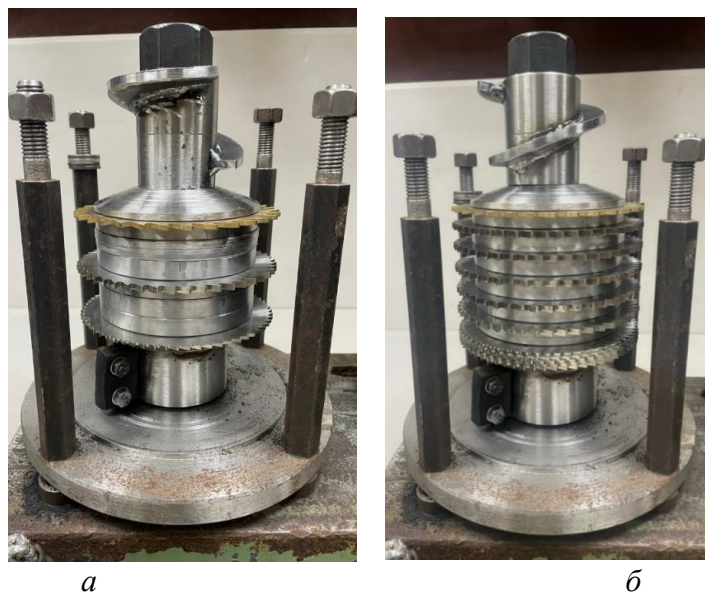
При уменьшении глубины внедрения зуба ножа в измельчаемый материал до значений, равных или меньших по сравнению с радиусом скругления кромки ножа инструмента, механизм взаимодействия меняется. Вместо классического резания зуб начинает вдавливать и проскальзывать по поверхности. Когда силы трения превышают прочностные характеристики материала, в поверхностном слое возникают поперечные трещины. Развитие этих трещин запускает механизм разрушения, известный как «истирание с отрывом», то есть происходит постепенное отдираание поверхностного слоя с образованием частиц «рваной» формы (рис. 1, *б*).



**Рис. 1. Резиновая крошка, полученная в результате переработки с использованием вертикального рабочего органа:**

*а* – «кубовидная» форма; *б* – «рваная» форма

Математическое описание процесса измельчения резинотехнических отходов разработано для измельчителя вертикального типа [8], основным рабочим органом которого является ротор с режущими и регулировочными ножами. В качестве последних используются дисковые отрезные фрезы по ГОСТ 2679–2014 [9] с внешним диаметром 125 мм и толщиной 2 мм (толщина ножа равна толщине зуба). Конструкция ротора предусматривает последовательный монтаж элементов на вертикальном валу (регулирующий нож, комплект режущих ножей с разделительными шайбами, конусная втулка). Частота вращения ротора  $n$  при измельчении изменяется в пределах 130–270 мин<sup>-1</sup>. Количество режущих ножей  $z$  варьируется от 3 до 6 шт. Толщина регулировочного ножа  $z_b$  на выходе может составлять 2, 4, 6, 8 или 10 мм (комплектация от 1 до 5 ножей соответственно, рис. 2). Данные параметры изменяются в зависимости от размера измельчаемого материала и требований к готовому продукту.



**Рис. 2. Ротор измельчителя вертикального типа в сборе:**  
*а* – минимальная компоновка; *б* – максимальная компоновка

В основе математического описания разрушения резинового массива (рис. 3) лежит гипотеза о том, что объем зоны уплотнения  $V_0$ , формируемой зубом ножа в массиве резины, до момента отрыва частицы может быть аппроксимирован как объем цилиндра. Это допущение условно для случая, когда расстояние резания значительно превышает толщину среза. Определим максимальное напряжение резания:

$$\sigma_m = \frac{\beta \cdot E \cdot W}{3(1-2\nu)} > [\sigma_r], \quad (1)$$

где  $W$  – энергия, вводимая зубом режущего ножа в массив резины, Дж;  
 $E$  – модуль Юнга, МПа;  
 $\nu$  – коэффициент Пуассона;  
 $[\sigma_r]$  – допустимый предел прочности резины на растяжение, МПа;  
 $\beta$  – коэффициента объемного расширения зоны уплотнения:

$$\beta = \frac{2\nu}{S \cdot E \cdot \Delta l} \quad (2)$$

$\Delta l$  – путь, пройденный зубом ножа, м:

$$\Delta l = R \Delta \alpha, \quad (3)$$

$R$  – радиус ножа, м;

$\Delta \alpha$  – угол поворота зуба режущего ножа, рад;

$S$  – площадь контакта зуба режущего ножа с массивом резины, м<sup>2</sup>:

$$S = \frac{A_1^2 \alpha^2}{4\pi}, \quad (4)$$

$\alpha$  – угол между зубьями ножа, рад;

$A_1$  – ширина зуба ножа, м.

Выражения (1)–(4) получены на основе геометрического и термодинамического анализа процесса разрушения резины при внедрении зуба ножа. Выражение (1) для максимального напряжения в зоне уплотнения следует из условия экстремума работы разрушения, найденного с использованием энергетического баланса и физико-механических характеристик материала (модуль Юнга, коэффициент Пуассона). Коэффициент объемного расширения  $\beta$  (2) выведен из предположения о цилиндрической форме зоны уплотнения, что позволило связать изменение ее объема с деформациями через коэффициент Пуассона. Величина  $\Delta l$  (3) представляет собой путь, пройденный зубом, и определяется радиусом ножа и углом поворота. Площадь контакта зуба с материалом  $S$  (4) рассчитана исходя из геометрических параметров зуба (ширина  $A_1$ ) и углового шага зубьев  $\alpha$ .

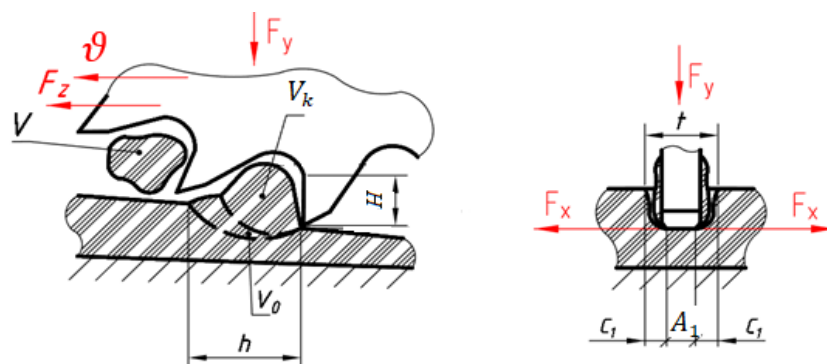


Рис. 3. Схематическое изображение процесса разрушения модели резинового массива

Найдено выражение для работы  $A_p$ , затрачиваемой на деформацию и разрушение материала в зоне уплотнения и необходимой для отделения одной частицы объемом  $V_k$ .

$$A_p = \frac{2\nu \cdot W_0 \cdot \sigma_r \cdot V_k}{E \cdot R \cdot \Delta l \cdot A_1} - \frac{3(1-2\nu) \cdot S \cdot \sigma_r^2 \cdot V_k^2 \cdot k^2}{2 \cdot E \cdot H \cdot A_1^2 \cdot R^2 \cdot \alpha^2}, \quad (5)$$

где  $V_k$  – объем частицы, отрезаемый зубом ножа, м<sup>3</sup>;

$k$  – коэффициент, учитывающий форму отрезаемого объема,  $k_0 = \frac{\pi}{6}$ ,  $k_{\square} = 1$ ;

$\sigma_r$  – предел прочности резины на растяжение, МПа;

$H$  – высота зуба ножа, м.

Выражение  $A_p$  описывает два различных режима разрушения резинового образца. Если значение коэффициента Пуассона материала близко к 0,5, что указывает на его практически несжимаемые свойства, то вторая часть выражения обращается в ноль. В этом случае первая часть формулы отвечает за процесс чистого резания, приводящий к образованию частиц «кубовидной» формы. Но если же коэффициент Пуассона менее 0,5, то наличие второй части выражения указывает на истирание в процессе измельчения. Этот режим запускает механизм разрушения с развитием трещин, известный как «истирание с отрывом» [6, 7], при котором происходит постепенное отдираание поверхностного слоя с образованием частиц «рваной» формы.

Из условия физической реализуемости процесса, когда  $A_p > 0$  (5), следует, что энергия  $W_0$ , вводимая зубом, должна превышать некоторое пороговое значение  $W_p$ , тогда:

$$W_0 \geq \frac{3(1-2\nu) \cdot S \cdot V_k \cdot k \cdot \sigma_r}{4\nu \cdot H \cdot A_1 \cdot \alpha}. \quad (6)$$

Энергию  $W_0$  также можно определить через кинетическую энергию зуба:

$$W_0 = \frac{\rho V_3}{2} R^2 \cdot \omega^2, \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность материала ножа, кг/м<sup>3</sup>;

$V_3$  – объем одного зуба, м<sup>3</sup>;

$\omega$  – частота вращения рабочего органа, с<sup>-1</sup>.

Подставляя (6) в (7), находим выражение для минимальной угловой скорости, обеспечивающей разрушение:

$$\omega_r = \left( \frac{3(1-2\nu)}{2\nu} \cdot \frac{V \cdot k}{V_3} \cdot \frac{S \cdot \sigma_r}{\rho \cdot R^2 \cdot H \cdot A_1 \cdot \alpha} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

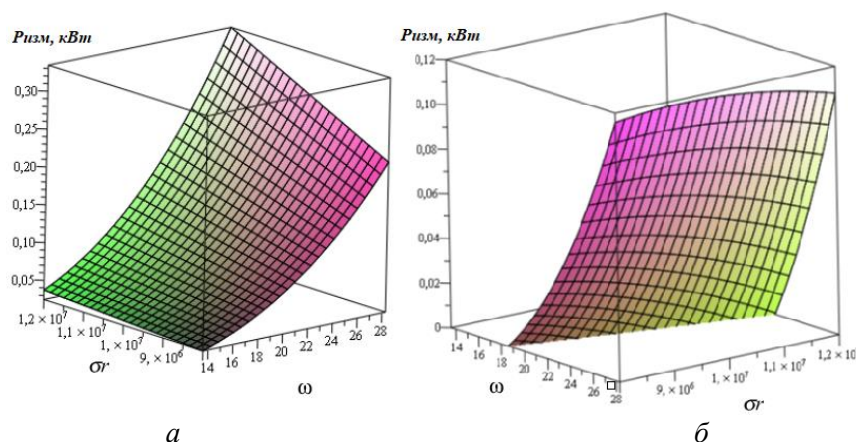
Максимальная работа  $A_{\max}$  и мощность  $P_{\max}$ , затрачиваемая на процесс измельчения, рассчитываются по формулам:

$$A_{\max} = \frac{\nu^2 \cdot H \cdot \rho^2 \cdot V_3^2 \cdot R^2 \cdot \omega^4}{6(1-2\nu) \cdot S \cdot E \cdot \alpha^2}, \quad (9)$$

$$P_{\max} = A_{\max} \cdot \omega \cdot z, \quad (10)$$

где  $z$  – количество режущих ножей, шт.

Таким образом, получено выражение мощности, затрачиваемой на процесс измельчения  $P_{\text{изм}}$  через максимальную работу (рис. 4) [10, 11], на основании которого построены графики при изменении частоты вращения рабочего органа  $\omega = 13,6\text{--}28,3 \text{ с}^{-1}$ , прочности резины на растяжение  $\sigma_r = 8\text{--}12 \text{ МПа}$  и толщины регулировочного ножа  $z_b = 2\text{--}10 \text{ мм}$  при максимальном количестве режущих ножей  $z = 7 \text{ шт.}$  [4].



**Рис. 4. Зависимость мощности измельчения  $P_{\text{изм}}$  от частоты вращения  $\omega$  и предела прочности  $\sigma_r$  при толщине регулировочного ножа:**

*а* –  $z_b = 2 \text{ мм}$ ; *б* –  $z_b = 10 \text{ мм}$

Установлено, что:

1 Максимальная мощность, затрачиваемая на измельчение, при минимальной толщине регулировочного ножа  $z_b = 2 \text{ мм}$  составляет  $P_{\text{изм}} = 0,334 \text{ кВт}$  при максимальной частоте вращения рабочего органа  $\omega = 28,3 \text{ с}^{-1}$  и максимальном допустимом значении предела прочности на растяжение материала  $\sigma_r = 12 \text{ МПа}$ . При частоте вращения  $\omega = 13,6 \text{ с}^{-1}$  и минимальном  $\sigma_r = 8 \text{ МПа}$ , мощность, затрачиваемая на измельчение, тоже имеет минимальное значение  $P_{\text{изм}} = 0,250 \text{ кВт}$ . В исследованном диапазоне условий реализуется процесс резания, обеспечивающий образование «кубовидной» крошки (см. рис. 1, *а*).

2 Максимальная мощность, затрачиваемая на измельчение, при максимальной толщине регулировочного ножа  $z_b = 10 \text{ мм}$  составляет  $P_{\text{изм}} = 0,119 \text{ кВт}$  при максимальной частоте вращения рабочего органа  $\omega = 28,3 \text{ с}^{-1}$  и максимальном значении предела прочности на растяжение материала  $\sigma_r = 12 \text{ МПа}$ . При частоте вращения  $\omega = 13,6 \text{ с}^{-1}$  и минимальном  $\sigma_r = 8 \text{ МПа}$ , мощность, затрачиваемая на измельчение, тоже имеет минимальное значение  $P_{\text{изм}} = 0,113 \text{ кВт}$ . Увеличение толщины регулировочного ножа при низкой частоте вращения рабочего органа приводит к снижению энергозатрат по сравнению с использованием ножа минимальной толщины. Это объясняется увеличением площади среза, что снижает требуемое удельное усилие благодаря свойствам измельчаемого материала и уменьшает объем зоны уплотнения, где доминирующее влияние оказывает объемная деформация, а частицы получают «рваной» формы (см. рис. 1, *б*).

Анализ результатов экспериментальных исследований [4] позволил выявить связь между режимами работы измельчителя и формой получаемых частиц резиновой крошки, при этом установлено, что:

а) при толщине регулировочного ножа  $z_b = 2 \text{ мм}$  и частоте вращения рабочего органа  $\omega = 28,3 \text{ с}^{-1}$  образуется «кубовидная» крошка размером 1–3 мм (см. рис. 1, *а*), в готовом продукте увеличивается количество частиц «кубовидной» формы с преобладающей фракцией 3 мм. Высокая скорость воздействия режущего органа при минимальной толщине регулировочного ножа обеспечивает быстрое и локализованное внедрение зуба, при котором процесс приближается к чистому резанию. Мощность расходуется преимущественно на формирование новой поверхности, а не на объемную деформацию, что минимизирует пластическое течение материала по краям среза и производит однородные по форме частицы (см. рис. 1, *а*);

б) при толщине регулировочного ножа  $z_b = 10 \text{ мм}$  и частоте вращения рабочего органа  $\omega = 13,6 \text{ с}^{-1}$  образуется «рваная» крошка размером 1–3 мм (см. рис. 1, *б*), что в готовом продукте увеличивает количество частиц «рваной» формы с преобладающей фракцией 1 мм из-за максимальной толщины режущего ножа и минимальной частоты вращения рабочего органа. Физическая интерпретация данного процесса заключается в доминировании механизмов разрыва и сдвига над чистым резанием. Снижение скорости и увеличение толщины регулировочного ножа способствуют многократной деформации материала перед его разрушением, что и формирует «рваные» края частиц (см. рис. 1, *б*).

### Заключение

Предложено математическое описание разрушения резинотехнических изделий при воздействии вертикального рабочего органа.

Получено выражение для работы  $A_p$ , необходимой для отделения частицы, которое описывает два режима разрушения в зависимости от значения коэффициента Пуассона. Если последний близок к 0,5, процесс сводится к чистому резанию с образованием «кубовидных» частиц. Если коэффициент менее 0,5, то преобладает режим «истирания с отрывом», приводящий к образованию частиц «рваной» формы.

Мощность, затрачиваемая на измельчение  $P_{изм}$ , в исследованном диапазоне параметров имеет прямую зависимость от частоты вращения и предела прочности на растяжение, где  $\omega = 13,6\text{--}28,3 \text{ с}^{-1}$  и  $\sigma_r = 8\text{--}12 \text{ МПа}$ . Так, при минимальной толщине ножа  $z_b = 2 \text{ мм}$  и при максимальных  $\omega$  и  $\sigma_r$  максимальная мощность, затрачиваемая на измельчение,  $P_{изм} = 0,334 \text{ кВт}$ . При данных условиях реализуется режим резания, обеспечивающий кубовидную форму частиц.

Увеличение толщины ножа до  $z_b = 10 \text{ мм}$  приводит к снижению энергозатрат на измельчение  $P_{изм} = 0,119 \text{ кВт}$  вследствие роста площади среза и снижения удельного усилия растяжения. Данный режим характеризуется уменьшенным влиянием объемной деформации в зоне уплотнения, однако формирует частицы «рваной» формы.

### Выводы

Анализ результатов экспериментальных исследований подтверждает связь между режимами измельчения и морфологией частиц: использование максимальной толщины ножа при минимальной частоте вращения рабочего органа приводит к доминированию механизмов разрыва и сдвига, формирующих «рваную» крошку с преобладанием фракции 1 мм. И наоборот, сочетание минимальной толщины ножа с максимальной частотой вращения обеспечивает условия, близкие к чистому резанию, при котором энергия расходуется преимущественно на образование новой поверхности, что минимизирует пластическую деформацию и позволяет получать «кубовидную» крошку с преобладанием фракции 3 мм.

### Список литературы

1 Об утверждении требований при обращении с группами однородных отходов I–V классов опасности : приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 11 июня 2021 г. № 399 (ред. от 04.04.2023) // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202111300043> (дата обращения: 15.03.2026).

2 **Lozovaya, S. Yu.** Investigation of particle kinematics and strength characteristics of a set of multi-knife tools for the disposal of rubber products / S. Yu. Lozovaya, Ya. P. Topchy, V. M. Kravchenko // Practice Oriented Science : UAE – Russia – India : proceedings of the International university scientific forum. – UAE, 2024. – P. 140–144. – DOI 10.34660/INF.2024.39.26.047.

3 **Соловьев, Е. М.** Применение измельченной резиновой крошки в изделиях резиновой промышленности / Е. М. Соловьев, Ю. Ю. Соловьева, Т. Н. Насиаловская // Каучук и резина. – 1994. – № 4. – С. 36–46. – ISSN 0022-9466.

4 **Лозовая, С. Ю.** Исследование работоспособности вертикального ротора измельчителя при получении резиновой крошки / В. М. Кравченко, С. Ю. Лозовая, Ю. А. Бондаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3 (99). – С. 214–222. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_214.

### References

1 On approval of requirements for handling groups of homogeneous waste of I–V hazard classes : the Order Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated June 11, 2021 No. 399 (as amended on April 4, 2023) // Official internet portal of legal information. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202111300043> (date of access: 15.03.2026).

2 **Lozovaya, S. Yu.** Investigation of particle kinematics and strength characteristics of a set of multi-knife tools for the disposal of rubber products / S. Yu. Lozovaya, Ya. P. Topchy, V. M. Kravchenko // Practice Oriented Science : UAE – Russia – India : proceedings of the International university scientific forum. – UAE, 2024. – P. 140–144. – DOI 10.34660/INF.2024.39.26.047.

3 **Soloviev, E. M.** Use of crushed rubber crumb in rubber industry products / E. M. Soloviev, Yu. Yu. Solovieva, T. N. Nasialovskaya // Kauchuk i Rezina. – 1994. – No. 4. – P. 36–46. – ISSN 0022-9466.

4 **Lozovaya, S. Yu.** Study of the performance of a vertical rotor of a grinder in obtaining rubber crumb / V. M. Kravchenko, S. Yu. Lozovaya, Yu. A. Bondarenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 3 (99). – P. 214–222. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_214.

- 5 **Бойцов, А. Г.** Основы механической обработки деталей. Точение и фрезерование : учебное пособие / А. Г. Бойцов, В. И. Высоцкая, Д. Н. Курицын. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 152 с. – ISBN 978-5-9729-1405-0.
- 6 **Клищенко, В. П.** Разрушение резин при различных способах механического воздействия / В. П. Клищенко, Ю. Р. Абдрахимов, Н. В. Вадудина // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2013. – № 12. – С. 419–429. – eISSN 1813-503X.
- 7 **Протасов, Ю. И.** Теоретические основы механического разрушения горных пород / Ю. И. Протасов. – Москва : Недра, 1985. – 242 с.
- 8 **Патент на полезную модель RU 237123.** Вертикальный измельчитель для переработки резинотехнических изделий / В. М. Кравченко, С. Ю. Лозовая, В. А. Чмулев. – № 2025114653 ; заявл. 29.05.2025 ; опубл. 11.09.2025.
- 9 **ГОСТ 2679–2014.** Фрезы прорезные и отрезные. Технические условия : межгосударственный стандарт. – Введ. 01.01.2016. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 15 с.
- 10 **Рахимов, И. Р.** Теоретическое обоснование способа разделения материала в ударно-центробежных измельчителях / И. Р. Рахимов, А. А. Смышляев, С. В. Морозова // АПК России. – 2022. – Т. 29, № 5. – С. 629–635. – DOI 10.55934/2587-8824-2022-29-5-629-635.
- 11 **Беззубцева, М. М.** Изучение процесса измельчения продуктов методом академика А. Н. Колмогорова / М. М. Беззубцева, В. С. Волков // LXXIII Международные научные чтения (памяти А. Н. Колмогорова) : сборник статей Международной научно-практической конференции. – Москва, 2020. – С. 27–30. – ISBN 978-5-6044222-5-0.
- 5 **Boytsov, A. G.** Fundamentals of mechanical processing of parts. Turning and milling : a textbook / A. G. Boytsov, V. I. Vysotskaya, D. N. Kuritsyn. – Moscow ; Vologda : Infra-Inzheneriya, 2023. – 152 p. – ISBN 978-5-9729-1405-0.
- 6 **Klishchenko, V. P.** Destruction of rubber under various methods of mechanical action / V. P. Klishchenko, Yu. R. Abdrakhimov, N. V. Vadulina // Electronic scientific journal “Oil and Gas Business”. – 2013. – No. 12. – P. 419–429. – eISSN 1813-503X.
- 7 **Protasov, Yu. I.** Theoretical foundations of mechanical destruction of rocks / Yu. I. Protasov. – Moscow : Nedra, 1985. – 242 p.
- 8 **Patent for utility model RU 237123.** Vertical grinder for processing rubber products / V. M. Kravchenko, S. Yu. Lozovaya, V. A. Chmulev. – No. 2025114653 ; declared 29.05.2025 ; published 11.09.2025.
- 9 **GOST 2679–2014.** Slotting and cutting milling cutters. Technical specifications : the interstate standard. – Introduced 01.01.2016. – Moscow : Standartinform, 2020. – 15 p.
- 10 **Rakhimov, I. R.** Theoretical substantiation of the method for separating material in impact-centrifugal crushers / I. R. Rakhimov, A. A. Smyshlyayev, S. V. Morozova // AIC of Russia. – 2022. – Vol. 29, No. 5. – P. 629–635. – DOI 10.55934/2587-8824-2022-29-5-629-635.
- 11 **Bezzubtseva, M. M.** Study of the process of grinding products by the method of Academician Kolmogorov A. N. / M. M. Bezzubtseva, V. S. Volkov // LXXIII International scientific readings (in memory of A. N. Kolmogorov) : collection of articles from the International scientific and practical conference. – Moscow, 2020. – P. 27–30. – ISBN 978-5-6044222-5-0.

*S. Yu. Lozovaya, V. P. Voronov, V. M. Kravchenko*

#### **MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE PROCESS OF RECYCLING RUBBER PRODUCTS BY A WORKING ELEMENT WITH A VARIABLE ARRANGEMENT OF KNIVES**

**Abstract.** The process of recycling rubber products using a working element with a variable arrangement of knives is examined. It has been established that a device with a vertical working element is most effective for increasing the number of stages of grinding. The spheres of rubber crumb use are systematized: the production of building materials, road construction components, application as reclaimed material, etc. Due to the lack of general knowledge of the issues of grinding elastomers, such as rubber, and the lack of well-established theoretical approaches to this process, it is advisable to consider the destruction of rubber into crumb in the mathematical description from the perspective of its reuse in another product. That is, the crumb production mechanism itself should be considered, rather than the cutting process typical of mechanical processing, the purpose of which is to give the product a shape. Based on geometric and energy analysis, a mathematical description of the pre-fracture zone ahead of the tooth front was made. An expression for the volumetric expansion coefficient of the compaction zone was obtained, and the minimum rotor speed was determined to ensure effective

particle separation. The influence of technological parameters (rotation speed  $\omega$ , number of cutting knives  $z$ , thickness of the adjusting knife  $z_b$ ) on the grinding power and particle morphology has been established.

**Keywords:** rubber products, working element, elastomers, recycling, compaction zone, volumetric expansion coefficient, deformation work, power, mathematical description, variable arrangement of knives.

**For citation:** Lozovaya, S. Yu. Mathematical description of the process of recycling rubber products by a working element with a variable arrangement of knives / S. Yu. Lozovaya, V. P. Voronov, V. M. Kravchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 195–202. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_195.

#### Сведения об авторах

**Лозовая Светлана Юрьевна**

Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова (БГТУ), кафедра механического оборудования, доктор технических наук, профессор, e-mail: Lozwa@mail.ru

**Воронов Виталий Павлович**

Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова (БГТУ), кафедра механического оборудования, кандидат физико-математических, доцент, e-mail: v.p.voronov2018@gmail.com

**Кравченко Владимир Михайлович**

Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова (БГТУ), кафедра механического оборудования, аспирант, e-mail: livenec.vova@mail.ru

#### Information about the authors

**Lozovaya Svetlana Yurievna**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU), Chair “Mechanical Equipment”, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: Lozwa@mail.ru

**Voronov Vitaly Pavlovich**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU), Chair “Mechanical Equipment”, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: v.p.voronov2018@gmail.com

**Kravchenko Vladimir Mikhailovich**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU), Chair “Mechanical Equipment”, Postgraduate Student, e-mail: livenec.vova@mail.ru

*И. А. Майба, А. М. Ананко, И. И. Майба*

## **АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ АКТИВАЦИИ ТРЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОВОЗАХ СЕРИИ ЗЭС5К**

**Аннотация.** Представлены результаты анализа режимов функционирования системы активации трения (УАТЛ), установленной на электровозах серии ЗЭС5К, по данным подконтрольной эксплуатации на Восточном полигоне. Исследование выполнено на основе расшифровки файлов микропроцессорных систем управления локомотивом (МСУД) за 2025 год и охватывает 2 629 поездов, выполненных 11 электровозами. Проведена сравнительная оценка режимов работы локомотивов с включённой и отключённой системой УАТЛ с использованием удельных эксплуатационных показателей. Установлено, что при технической исправности оборудования фактическое использование УАТЛ носит неравномерный характер и в значительной степени определяется человеческим и организационным фактором. Показано, что система УАТЛ преимущественно работает в автоматических режимах и обладает высоким потенциалом для снижения нагрузки на систему пескоподачи и локомотивную бригаду. Сделан вывод о необходимости внедрения регламентированных подходов к использованию УАТЛ для повышения эффективности эксплуатации локомотивного парка.

**Ключевые слова:** устройство активации трения, локомотив ЗЭС5К, тягово-сцепные свойства, эксплуатационные показатели, пескоподача, подконтрольная эксплуатация, человеческий фактор, энергоэффективность.

**Для цитирования:** Майба, И. А. Анализ режимов функционирования системы активации трения на электровозах серии ЗЭС5К / И. А. Майба, А. М. Ананко, И. И. Майба // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 203–208. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_203.

### **Введение**

Одним из факторов, ограничивающих устойчивость перевозочного процесса при эксплуатации тяжёловесных поездов, является необходимость внеплановых заходов локомотивов на экипировку песком между плановыми техническими обслуживаниями в объёме ТО-2. Указанные технологические операции приводят к выводу локомотивов из кольца обращения, увеличению простоев и снижению эффективности использования локомотивного парка [5, 6].

Одним из направлений решения данной задачи является применение систем активации трения колёс локомотивов, обеспечивающих повышение коэффициента сцепления без интенсивного использования пескоподачи. Использование таких систем позволяет стабилизировать реализацию тяговых усилий, снизить нагрузку на систему пескоподачи и сократить влияние человеческого фактора при управлении локомотивом [4, 6, 7].

Среди отечественных разработок наиболее перспективным является инновационный проект (ООО «ТрансИнТех»), в рамках которого специалистами при участии научных организаций (ФГБОУ ВО РГУПС и ФГБОУ ВО ПГУПС) и промышленного предприятия (ООО ПК «НЭВЗ») было разработано устройство активации трения локомотивов (УАТЛ), ориентированное на повышение тягово-сцепных свойств локомотивов и снижение эксплуатационных затрат [1, 9, 10].

В настоящей работе рассматриваются результаты анализа эксплуатационной работы электровозов серии ЗЭС5К, оборудованных устройством активации трения локомотивов (УАТЛ), в условиях грузового движения на Восточном полигоне.

### **Материалы и методы исследований**

Исследование выполнено на основе анализа объективных данных МСУД, полученных в процессе подконтрольной эксплуатации электровозов серии ЗЭС5К в 2025 году.

Сравнительный анализ проведён для одних и тех же локомотивов при работе с включённой и отключённой системой УАТЛ в идентичных условиях эксплуатации на одном полигоне. Для исключения влияния различий в интенсивности работы локомотивов все показатели приведены к удельным значениям на 1 000 км пробега. Применяемая методика сопоставима с ранее опубликованными исследованиями по оценке тягово-энергетических характеристик электровозов серии ЗЭС5К [2].

Формирование выборки осуществлялось с применением процедуры фильтрации, направленной на исключение поездок с некорректными или неполными данными, что обеспечило сопоставимость и репрезентативность анализируемых массивов.

#### **Цель и задачи исследований**

На основании объективных данных МСУД требовалось провести сравнительную оценку особенностей функционирования и фактического использования системы УАТЛ. При этом следовало определить степень использования системы УАТЛ локомотивными бригадами и дать оценку влияния УАТЛ на работу системы пескоподачи.

#### **Объём и формирование выборки данных**

Первичной базой для анализа послужили данные о 3 068 поездках, выполненных 11 локомотивами серии ЗЭС5К, оборудованными УАТЛ, в период до 14.12.2025 г. Для обеспечения корректности и сравнимости результатов была проведена процедура фильтрации данных, в ходе которой исключено 439 поездок по следующим причинам:

- поездки, совершенные в 2024 году, – 55 поездок;
- спаренные поезда (не позволяющие однозначно определить ответственный локомотив и режим работы системы УАТЛ) – 192 поездки;
- отсутствие данных о пройденном расстоянии – 9 поездок;
- отсутствие однозначной информации о режиме работы системы УАТЛ (ВКЛ / ВЫКЛ / ВКЛ) в рамках поездки – 98 поездок;
- ошибки в данных по расходу электроэнергии (противоречивые) или нулевые показания приборов учёта) – 83 поездки;
- отсутствие заполненных режимов работы – 2 поездки.

Таким образом, итоговая репрезентативная выборка для проведения сравнительного анализа составила 2 629 поездок, распределённых следующим образом:

- 883 поездки с включенной системой УАТЛ (режим «УАТЛ – ВКЛ»);
- 1 746 поездок с выключенной системой УАТЛ (режим «УАТЛ – ВЫКЛ»).

В табл. 1 представлено распределение по весовым категориям поездов.

Таблица 1

**Распределение поездок по весовым категориям поездов**

№ п/п	Режим работы УАТЛ	Количество поездок с весом поезда			Всего, шт.
		До 4 000 т	4 000–6 000 т	6 000–7 100 т	
1	УАТЛ ВКЛ	98 поездок	86 поездок	699 поездок	883 поездки
2	УАТЛ ВЫКЛ	236 поездок	166 поездок	1 344 поездки	1 746 поездок
<i>Итого</i>		334 поездки	252 поездки	2 043 поездки	2 629 поездок

Данное распределение демонстрирует, что в анализируемой выборке преобладают поезда критической массы (6 000–7 000 т), что характерно для условий эксплуатации на Восточном полигоне и позволяет наиболее объективно оценить работу системы УАТЛ в нагруженных режимах.

Детализация по локомотивам серии ЗЭС5К, оборудованным УАТЛ:

- № 1147 – 209 поездок (104 с УАТЛ);
- № 1445 – 208 поездок (82 с УАТЛ);
- № 1446 – 241 поездка (58 с УАТЛ);
- № 1447 – 282 поездки (64 с УАТЛ);
- № 1448 – 290 поездок (116 с УАТЛ);
- № 1449 – 282 поездки (118 с УАТЛ);
- № 1450 – 231 поездка (62 с УАТЛ);
- № 1451 – 217 поездок (76 с УАТЛ);
- № 1452 – 287 поездок (33 с УАТЛ);
- № 1453 – 177 поездок (46 с УАТЛ);
- № 1454 – 205 поездок (124 с УАТЛ).

#### **Результаты исследований**

В течение 2025 года 11 электровозов серии ЗЭС5К выполнили 2 629 поездок, из которых в 883 поездках (33,6 %) система УАТЛ находилась во включённом состоянии. В оставшихся 1 746 поездках

система УАТЛ не использовалась при наличии технической возможности её применения.

Полученные результаты по режимам работы системы УАТЛ и эксплуатационным характеристикам электровозов серии ЗЭС5К согласуются с ранее опубликованными экспериментальными исследованиями, посвящёнными влиянию активации трения на тягово-сцепные свойства колес локомотивов и энергетические показатели движения [2, 3].

В табл. 2 приведена общая статистика использования системы УАТЛ.

Таблица 2

Общая статистика использования системы УАТЛ

№ п/п	Показатель	С УАТЛ	Без УАТЛ	Соотношение (без УАТЛ / с УАТЛ)	Вывод
1	Общее количество поездок, шт.	883	1 746	≈ в 2,0 раза больше	Локомотивы без УАТЛ совершили вдвое больше поездок
2	Общий вес перевезённого груза, т	5 600 750	10 882 360	≈ в 1,94 раза больше	Соответствует увеличению поездок
3	Общий пробег, км	225 342	447 510	≈ в 1,98 раза больше	Пробег также почти вдвое больше

Более детальный анализ по каждому локомотиву выявляет значительную диспропорцию в применении системы разными локомотивными бригадами. Для наглядности разделим локомотивы на три группы по проценту поездок с УАТЛ от общего числа их рейсов.

*Группа 1.* Локомотивы с высоким использованием УАТЛ (> 45 % поездок):  
 локомотив № 1454 – 124 поездки с УАТЛ из 205 общего количества (60,5 %);  
 локомотив № 1147 – 104 поездки с УАТЛ из 209 общего количества (49,8 %).

Вывод: данные примеры подтверждают, что система может быть основным, а не резервным инструментом.

*Группа 2.* Локомотивы со средним использованием УАТЛ (30–45 %):  
 локомотив № 1449 – 118 поездок с УАТЛ из 282 общего количества (41,8 %);  
 локомотив № 1448 – 116 поездок с УАТЛ из 290 общего количества (40,0 %);  
 локомотив № 1445 – 82 поездки с УАТЛ из 208 общего количества (39,4 %).

Вывод: использование системы носит периодический или ситуационный характер.

*Группа 3.* Локомотивы с низким использованием УАТЛ (< 30 %):  
 локомотив № 1452 – 33 поездки с УАТЛ из 287 общего количества (11,5 % – антирекорд);  
 локомотив № 1447 – 64 поездки с УАТЛ из 282 общего количества (22,7 %);  
 локомотив № 1446 – 58 поездок с УАТЛ из 241 общего количества (24,1 %);  
 локомотив № 1453 – 46 поездок с УАТЛ из 177 общего количества (26,0 %);  
 локомотив № 1450 – 62 поездки с УАТЛ из 231 общего количества (26,8 %).

Вывод: технически исправная система регулярно не используется, что указывает на преобладание человеческого фактора.

*Конкретные примеры на основе полученных данных*

Пример эффективного использования: локомотив № 1454 является флагманом внедрения.

За год он совершил 124 поездки с УАТЛ, в которых система проработала в автоматических режимах суммарно 109 849 с (~30 ч). При этом его пробег в режиме с УАТЛ составил 33 259 км.

Пример неэффективного использования: локомотив № 1452 демонстрирует обратную картину. При общем пробеге в 71 621 км (максимальный из всех) система УАТЛ использовалась лишь в 33 поездках (11,5 %). Время её работы составило лишь 22 616 с (~6,3 ч), что в 4,7 раза меньше, чем у локомотива № 1454, несмотря на практически сопоставимый удельный пробег, приходящийся на одну поездку. Показательный контраст: сравнение локомотивов № 1449 и № 1447 с близким общим количеством поездок (по 282 шт.). На локомотиве № 1449 УАТЛ использовалась в 118 поездках (41,8 %), а на № 1447 – только в 64 (22,7 %). Разница почти в два раза при идентичных условиях работы парка.

Анализ режимов функционирования системы показал доминирование автоматических режимов работы (А1-А3) и минимальную долю ручного управления со стороны локомотивной бригады. Данный результат

соответствует современным представлениям о трибологических процессах в зоне контакта «колесо – рельс» и их влиянии на эксплуатационную надёжность и ресурс элементов подвижного состава [3, 4, 8].

#### *Распределение работы по режимам*

Режим А3 (автоматическое устранение буксования) – самый часто используемый. Например, у локомотива № 1454 на него пришлось 64 940 с из 109 849 общих (более 59 %). Автоматические режимы (А1, А2, А3) являются абсолютно доминирующими.

Режимы А1/А2 (автоматическое предупреждение буксования) активно использовались на локомотивах, где бригады доверяли системе. Например, локомотивы № 1454, 1449, 1451 и 1147 использовали А1 и А2 режимы суммарно по 42 898, 42 199, 39 060 и 31 530 с соответственно.

Ручной режим (Р2) применялся минимально. Его доля в общем времени работы УАТЛ по всем локомотивам составляет менее 2 %. Это свидетельствует о высокой степени автономности и надежности системы.

Например, у локомотива № 1445 при 82 поездках с УАТЛ ручной режим использовался всего 1 115 с (~18,5 мин), что свидетельствует о редкой необходимости вмешательства машиниста в работу системы.

#### *Пример работы локомотива № 1147*

Общее время работы УАТЛ

$$7\,791\text{ с (А1)} + 23\,739\text{ с (А2)} + 35\,380\text{ с (А3)} + 586\text{ с (Р2)} = 67\,496\text{ с.}$$

Доля автоматических режимов

$$(7\,791\text{ с} + 23\,739\text{ с} + 35\,380\text{ с}) / 67\,496\text{ с} \times 100\% \approx 99,1\%.$$

Доля ручного режима

$$586\text{ с} / 67\,496\text{ с} \times 100\% \approx 0,9\%.$$

Разброс доли поездок с включённой системой УАТЛ по отдельным локомотивам (от 11,5 % до 60,5 %) свидетельствует об отсутствии единых регламентированных подходов к использованию системы в процессе эксплуатации. Результаты исследования указывают на существенное влияние организационных и человеческих факторов на степень реализации потенциала УАТЛ [5].

Полученные данные носят статистически устойчивый характер и отражают типичную практику эксплуатации системы УАТЛ на Восточном полигоне.

#### **Заключение**

Исследование, выполненное на основе данных микропроцессорных систем управления локомотивом (МСУД), позволило провести анализ режимов функционирования системы активации трения локомотивов (УАТЛ) в условиях эксплуатации на Восточном полигоне.

Установлено, что система УАТЛ функционирует преимущественно в автоматических режимах и характеризуется высокой степенью автономности, что подтверждает её техническую зрелость и работоспособность.

Выявлена существенная неравномерность использования системы УАТЛ между локомотивами при сопоставимых условиях эксплуатации. Разброс доли поездок с включённой системой от 11,5 до 60,5 % указывает на определяющее влияние организационного и человеческого факторов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что потенциал системы УАТЛ в текущих условиях эксплуатации реализуется не полностью вследствие отсутствия единых регламентированных подходов к её применению.

Практическая значимость работы заключается в обосновании необходимости разработки и внедрения регламентов использования системы УАТЛ, направленных на повышение эффективности её применения в эксплуатации локомотивного парка.

#### **Список литературы**

1 **Майба, И. А.** Разработка систем активации трения локомотивов / И. А. Майба, А. Л. Выщепан, А. М. Ананко // Научные основы и технологии повышения ресурса и живучести подвижного состава железнодорожного транспорта :

#### **References**

1 **Maiba, I. A.** Development of friction activation systems for locomotives / I. A. Maiba, A. L. Vyshchepan, A. M. Ananko // Scientific foundations and technologies for increasing the service

сборник трудов международной научной конференции. – Коломна, 2021. – С. 228–232.

2 **Майба, И. А.** Сравнительные тягово-энергетические испытания локомотивов серии 3ЭС5К / И. А. Майба, И. И. Майба // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3 (99). – С. 117–124. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_117.

3 **Майба, И. А.** Исследование влияния активации трения на тягово-цепные свойства колес локомотивов / И. А. Майба, Д. В. Глазунов, И. И. Майба // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2024. – № 4. – С. 55–60. – DOI 10.1134/S1052618824701401.

4 **Майба, И. А.** Фрикционные материалы специального назначения для зоны контакта «колесо – рельс»: монография / И. А. Майба, Д. В. Глазунов, А. М. Ананко. – Ростов-на-Дону, 2017. – 123 с. – ISBN 978-5-88814-523-4.

5 **Валинский, О. С.** Повышение эффективности использования тягового подвижного состава / О. С. Валинский // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 3. – С. 24–27. – ISSN 0044-4448.

6 **Лужнов, Ю. М.** Управление фрикционным взаимодействием колес подвижного состава с рельсами – резерв снижения себестоимости перевозочной работы / Ю. М. Лужнов, А. Т. Романова // Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. – 2016. – № 3. – С. 11–15. – ISSN 2411-9520.

7 **Валинский, О. С.** Улучшение тяговых характеристик электровозов за счёт повышения коэффициента сцепления «колеса и рельса»: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / О. С. Валинский. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2022. – 131 с.

8 **Воробьев, А. А.** Прогнозирование ресурса и совершенствование технологии ремонта колес железнодорожного подвижного состава: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А. А. Воробьев. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2018. – 289 с.

9 Обоснование технических требований к активаторам трения в зоне контакта «колесо – рельс» / И. А. Майба, А. М. Ананко, А. С. Бекетов, М. И. Никитина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1 (65). – С. 54–61. – ISSN 0201-727X.

10 **Патент № 2721993 Российская Федерация.** Устройство активации трения и активатор

life and survivability of railway rolling stock: collection of papers of the international scientific conference. – Kolomna, 2021. – P. 228–232.

2 **Maiba, I. A.** Comparative traction and energy tests of 3ES5K series locomotives / I. A. Maiba, I. I. Maiba // Trudy of the Rostov State Transport University. – 2025. – No. 3 (99). – P. 117–124. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_117.

3 **Maiba, I. A.** Study of the influence of friction activation on the traction and adhesion properties of locomotive wheels / I. A. Maiba, D. V. Glazunov, I. I. Maiba // Problems of mechanical engineering and automation. – 2024. – No. 4. – P. 55–60. – DOI 10.1134/S1052618824701401.

4 **Maiba, I. A.** Special-purpose friction materials for the wheel-rail contact zone: monograph / I. A. Maiba, D. V. Glazunov, A. M. Ananko. – Rostov-on-Don: Rostov State Transport University, 2017. – 123 p. – ISBN 978-5-88814-523-4.

5 **Valinsky, O. S.** Improving the efficiency of traction rolling stock use / O. S. Valinsky // Railway transport. – 2022. – No. 3. – P. 24–27. – ISSN 0044-4448.

6 **Luzhnov, Yu. M.** Control of frictional interaction of rolling stock wheels with rails – a reserve for reducing the cost of transportation work / Yu. M. Luzhnov, A. T. Romanova // Innovative economics: information, analytics, forecasts. – 2016. – No. 3. – P. 11–15. – ISSN 2411-9520.

7 **Valinsky, O. S.** Improving the traction characteristics of electric locomotives by increasing the adhesion coefficient of “wheel and rail”: specialty 05.22.07 “Rolling stock of railways, train traction and electrification”: dissertation for the degree of candidate of technical sciences / O. S. Valinsky. – Saint Petersburg: PGUPS, 2022. – 131 p.

8 **Vorobyov, A. A.** Forecasting the resource and improving the repair technology of railway rolling stock wheels: specialty 05.22.07 “Rolling stock of railways, train traction and electrification”: dissertation for the degree of doctor of technical sciences / A. A. Vorobyov. – Saint Petersburg: PGUPS, 2018. – 289 p.

9 Justification of technical requirements for friction activators in the wheel-rail contact zone / I. A. Maiba, A. M. Ananko, A. S. Beketov, M. I. Nikitina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2017. – No. 1 (65). – P. 54–61. – ISSN 0201-727X.

10 **Patent No. 2721993 Russian Federation.** Friction activator and increased friction activator:

повышенного трения : № 2019117405 : заявл. 04.06.2019 : опубл. 25.05.2020 / О. С. Валинский, А. Л. Выщепан, А. М. Лубягов, И. А. Майба – 10 с.

No. 2019117405 : declared 04.06.2019: published 25.05.2020 / O. S. Valinsky, A. L. Vyshchepan, A. M. Lubyagov, I. A. Maiba – 10 p.

*I. A. Maiba, A. M. Ananko, I. I. Maiba*

### ANALYSIS OF OPERATING MODES OF THE FRICTION ACTIVATION SYSTEM IN 3ES5K ELECTRIC LOCOMOTIVES

**Abstract.** This paper presents the results of an analysis of the operating modes of the locomotive friction activation system (UATL) installed on 3ES5K electric locomotives, based on data obtained from supervised operation on the Eastern railway corridor.

The study is based on decoded data from microprocessor-based locomotive control systems (MSUD) for 2025 and includes 2 629 train trips performed by 11 electric locomotives.

A comparative analysis was carried out for locomotive operating modes with the UATL system switched on and off under similar operating conditions using specific performance indicators. The results show that, despite the technical operability of the system, its actual use is uneven and largely depends on organizational and human factors. It was shown that the UATL system operates primarily in automatic modes and has high potential for reducing the load on the sand delivery system and the locomotive crew.

It was concluded that it is necessary to implement regulated approaches to UATL use to improve the efficiency of locomotive fleet operation.

**Keywords:** locomotive friction activation device; 3ES5K electric locomotive; traction and adhesion properties; operational performance; sand delivery system; supervised operation; human factor; energy efficiency.

**For citation:** Maiba, I. A. Analysis of operating modes of the friction activation system in 3ES5K electric locomotives / I. A. Maiba, A. M. Ananko, I. I. Maiba // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 203–208. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_203.

#### Сведения об авторах

##### **Майба Игорь Альбертович**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), факультет «Дорожно-строительные машины», доктор технических наук, профессор, декан,  
e-mail: mia@rgups.ru

##### **Ананко Анатолий Михайлович**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), лаборатория функциональных покрытий, научно-испытательный центр «Нанотехнологии и трибосистемы» НИЧ, младший научный сотрудник,  
e-mail: nypotilitailla@mail.ru

##### **Майба Илья Игоревич**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Проектирование и технология производства машин», аспирант,  
e-mail: tmt@rgups.ru

#### Information about the authors

##### **Maiba Igor Albertovich**

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Road Construction Machinery”, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Dean,  
e-mail: mia@rgups.ru

##### **Ananko Anatoly Mikhailovich**

Rostov State Transport University (RSTU), Laboratory of Functional Coatings, Research and Testing Center “Nanotechnologies and Tribosystems”, Research Department Junior Researcher,  
e-mail: nypotilitailla@mail.ru

##### **Mayba Ilya Igorevich**

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Machine design and Production Technology”, Postgraduate Student,  
e-mail: tmt@rgups.ru

*С. И. Ханин, Р. В. Зыбин, В. П. Воронов, О. С. Мордовская*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ МАТЕРИАЛОМЕЛЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ В БИСЕРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ С ВИНТОВЫМ УСТРОЙСТВОМ \*

**Аннотация.** Применение бисерных мельниц распространено на промышленных предприятиях для тонкого и сверхтонкого помола различных многокомпонентных суспензий. Показаны целесообразность и возможность их конструктивного совершенствования. Приведено описание винтовых устройств, обеспечивающих повышение эффективности процесса диспергирования материала в корпусе мельницы. Обоснована необходимость в разработке математического описания, характеризующего работу бисерной мельницы разработанной конструкции, для установления ее рациональных параметров. Разработано математическое описание для определения продольной, радиальной и окружной компонент поля скоростей движения материаломелющей загрузки в корпусе горизонтальной бисерной мельницы с винтовыми устройствами. Проведены исследования влияния шага винта лопасти на величины компонент скорости ее движения, установлены закономерности, характеризующие возможность интенсификации процесса измельчения материала.

**Ключевые слова:** бисерная мельница, математическое описание, поле скоростей, частота вращения, измельчение.

**Для цитирования:** Определение поля скоростей материаломелющей загрузки в бисерной мельнице с винтовым устройством / С. И. Ханин, Р. В. Зыбин, В. П. Воронов, О. С. Мордовская // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 209–218. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_209.

### **Введение**

Процесс измельчения требует значительных энергозатрат. Тонкое и сверхтонкое измельчение относятся к наиболее энергоемким технологическим процессам. Одним из основных способов получения тонкодисперсных частиц является диспергационный. Часто используемым оборудованием для измельчения в жидкой среде являются бисерные мельницы. Их ключевые преимущества: простота конструкции, относительно высокая производительность при компактных размерах, мал шумность в работе, отсутствие металлического намола от мелющих тел, высокая однородность измельченного продукта и высокий уровень герметизации оборудования.

Благодаря сочетанию высокой эффективности и универсальности бисерные мельницы завоевали широкую популярность в различных отраслях промышленности, включая металлургическую, химическую, фармацевтическую, пищевую, косметическую и другие [1, 2]. Они незаменимы в тех процессах, где необходимо обеспечить интенсивное измельчение и равномерное смешивание материалов. В основном применяются два типа бисерных мельниц – вертикальные и горизонтальные.

В производстве лакокрасочных материалов (ЛКМ) бисерные мельницы выступают ключевым технологическим оборудованием. Процедура их замены на более эффективные аналоги сопряжена с существенными материальными затратами на реконструкцию производственного комплекса, а также с экономическими потерями, вызванными временным прекращением эксплуатации оборудования.

В этой связи разработка инновационных технических решений, ориентированных на повышение производительности и снижение удельного энергопотребления (применительно как к вновь создаваемому, так и к эксплуатируемому оборудованию в рамках плановых ремонтных работ), способствует формированию устойчивых конкурентных преимуществ предприятия.

Значения показателей работы технологических машин зависят от сочетания конструктивных и технологических параметров, обеспечивающих реализацию протекающих технологических процессов и их качественные и количественные характеристики [3–6].

С целью повышения эффективности процесса измельчения авторами предложена конструкция бисерной мельницы с многозаходными винтовыми лопастями [7]. В работе [8] была установлена целесообразность проведения теоретических и экспериментальных исследований, направленных на исследование

---

\* Работа выполнена с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

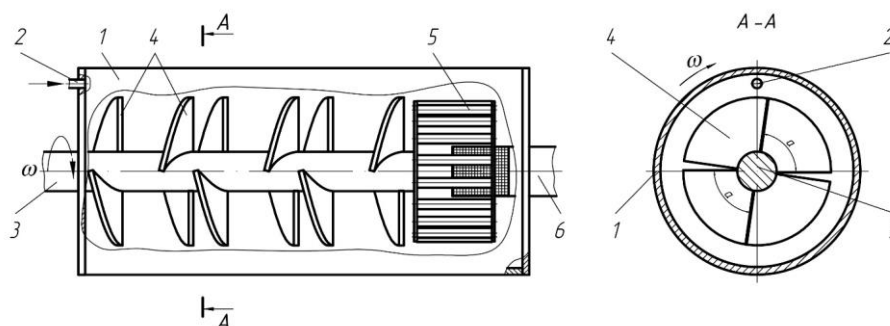
процесса измельчения материала в бисерной мельнице с многозаходными винтовыми лопастями и определение рациональных конструктивно-технологических параметров, обеспечивающих повышение эффективности этого процесса

Разработка математического описания процессов, происходящих внутри оборудования, является важным этапом, позволяющим установить рациональные параметры на этапе проектирования оборудования. В бисерной мельнице измельчение преимущественно происходит за счет истирания частиц материала о мелющие тела в материаломелющей загрузке, перемещение которой осуществляется за счет воздействия на нее вращающегося с большой скоростью рабочего органа в виде жестко закрепленных на валу винтовых лопастей. Определение поля скоростей движения мелющей загрузки от их воздействия позволит установить конструктивные и технологические параметры бисерной мельницы, обеспечивающие ее эффективную работу.

### Основная часть

На рис. 1 приведена схема предлагаемой конструкция бисерной мельницы с многозаходными винтовыми лопастями, интенсифицирующими процесс измельчения материала [7]. Мельница работает следующим образом: крутящий момент от привода передается валу 3. Вал с жестко закрепленными многозаходными лопастями 4 и выходным сепаратором 5 приводится во вращение. Направление вращения вала со стороны выходного сепаратора противоположно направлению заходов винта приближенных к сепаратору многозаходных лопастей. Предназначенный для помола материал в виде суспензии, подается под давлением через загрузочное отверстие 2 в корпус 1 с мелющей загрузкой в виде мелющих тел.

Материал в виде суспензии с уменьшающимися в результате интенсивного воздействия мелющими телами в размерах частицами под давлением со стороны вновь нагнетаемой через загрузочное отверстие 2 суспензии перемещается к выходному сепаратору 5. Из поступившей в выходной сепаратор 5 суспензии выделяются частицы, размеры которых превышают требуемые, а также попавшие в него мелющие тела, и возвращаются в материаломелющую загрузку, расположенную между многозаходными винтовыми лопастями. Материал, прошедший через разгрузочный патрубок 6, направляется в корпус на повторное измельчение через загрузочный патрубок 2, тем самым образуя замкнутый цикл измельчения, при котором качество помола материала будет определяться кратностью циркуляций.



**Рис. 1. Схема корпусной части бисерной мельницы:**

1 – корпус, 2 – загрузочный патрубок, 3 – лопастной вал, 4 – многозаходная винтовая лопасть, 5 – сепаратор, 6 – разгрузочный патрубок

Для определения поля скоростей материаломелющей загрузки для начала приведем расчетную схему (рис. 2).

Рассмотрение скоростного режима движения вязкой среды, состоящей из жидкости, мелющих тел и твердых частиц материала, при условии, что плотность данной среды является постоянной величиной ( $\rho = \text{const}$ ), можно провести в рамках уравнения непрерывности [9]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \cdot \vec{v}) = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность рассматриваемой вязкой среды, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\vec{v}$  – вектор скорости движения вязкой среды, м/с;  
 $\vec{\nabla}$  – дифференциальный оператор Набла.

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \vec{k}, \quad (2)$$

где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – орты в декартовой системе координат по осям  $x, y, z$  соответственно.

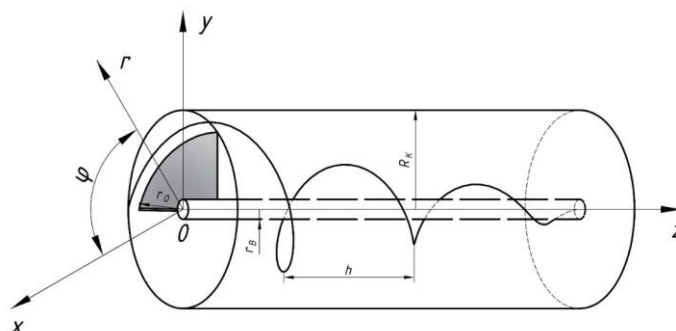


Рис. 2. Схема к расчету

Решение уравнения (1) при условии  $\rho = \text{const}$  ищем в следующем виде:

$$\vec{\vartheta} = -\vec{\nabla}\psi, \quad (3)$$

где  $\psi$  – скалярная функция, которая в силу аксиальной симметрии цилиндрической камеры зависит только от координат  $r, z$ ,  $\psi = \psi(r, z)$ .

$$\vec{\vartheta} = \{\vartheta_r, \vartheta_z, \vartheta_\varphi\}. \quad (4)$$

С учётом (3) уравнение (1) принимает вид:

$$\Delta\psi = 0, \quad (5)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа.

$$\Delta = (\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (6)$$

В силу того, что корпус рассматриваемой бисерной мельницы обладает осевой симметрией, так как выполнен в виде цилиндра, поэтому математическое описание скорости движения вязкой среды проведем в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$  (рис. 2), которая с декартовой системой связана соотношениями:

$$x = r \cdot \cos \varphi, \quad (7)$$

$$y = r \cdot \sin \varphi, \quad (8)$$

$$z = z. \quad (9)$$

Поле скоростей материаломелющей загрузки в бисерной мельнице в цилиндрической системе координат представим в следующем виде:

$$\vec{\vartheta} = \vartheta_r \cdot \vec{e}_r + \vartheta_\varphi \cdot \vec{e}_\varphi + \vartheta_z \cdot \vec{e}_z, \quad (10)$$

где  $\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$  – орты цилиндрической системы координат.

На основании сказанного уравнение (5) в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0. \quad (11)$$

Для определения коэффициента  $\mu$  динамической вязкости среды воспользуемся формулой Эйнштейна:

$$\mu = \mu_0 \left( 1 + \frac{5}{2} C_0 \right), \quad (12)$$

где  $C_0$  – объемная доля частиц материала в вязкой среде;  
 $\mu_0$  – коэффициент динамической вязкости чистой жидкости.  
 Введем следующее обозначение:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho}{\mu_0 (1 + \frac{5}{2} C_0)}}, \quad (13)$$

где  $\omega$  – частота вращения вязкой среды,  $\text{с}^{-1}$ .

Вязкую среду можно представить как квазитвердое тело, частота вращения  $\omega$  которого будет соответствовать частоте вращения вала с винтовой лопастью.

Решение уравнения (11) ищем в виде:

$$\psi(r, z) = \phi(r) \cdot \exp(-\alpha \cdot z). \quad (14)$$

Подстановка (14) в (11) дает:

$$\frac{d^2 \phi}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\phi}{dr} - \alpha^2 \cdot \phi = 0. \quad (15)$$

Решением уравнения (15), удовлетворяющего условию ограниченности в точке  $r = 0$ , является функция Бесселя нулевого порядка [10].

Получаем:

$$\psi(r, z) = C_1 \cdot J_0(\alpha \cdot r) \cdot \exp(-\alpha \cdot z), \quad (16)$$

где  $J_0$  – функция Бесселя нулевого порядка.

Постоянная величина  $C_1$  находится из начального условия:

$$\vartheta_z(r = r_0, z = 0) = \omega \cdot h, \quad (17)$$

где  $h$  – шаг винта, м;

$r_0$  – радиус винтовой лопасти, м.

Исходя из начального условия (17) находим, что:

$$C_1 = \frac{\omega \cdot h}{\alpha \cdot J_0(\alpha \cdot r_0)}. \quad (18)$$

На основании полученных выше соотношений находим компоненты скоростей:

$$\vartheta_r = \frac{\omega \cdot h}{J_0(\alpha \cdot r_0)} \cdot J_1(\alpha \cdot r) \cdot \exp(-\alpha \cdot z), \quad (19)$$

где  $J_1$  – функция Бесселя первого порядка.

$$\vartheta_z = \frac{\omega \cdot h}{J_0(\alpha \cdot r_0)} \cdot J_0(\alpha \cdot r) \cdot \exp(-\alpha \cdot z). \quad (20)$$

Проекцию окружной скорости  $\vartheta_\varphi$  можно представить в виде:

$$\vartheta_\varphi = R(r) \cdot \exp(-\alpha \cdot z), \quad (21)$$

где  $R(r)$  – линейная функция, значение которой можно найти из следующих соображений [11]:

$$r = r_B, z = 0, R(r_B) = \omega \cdot r_B, \quad (22)$$

где  $r_B$  – радиус вала, м.

$$r = r_0, z = 0, R(r_0) = \omega \cdot r_0. \quad (23)$$

$$r = R_K, z = 0, R(R_K) = 0, \quad (24)$$

где  $R_K$  – радиус помольной камеры, м.

С учетом (18) и (19) и (20) выражение (17) запишем в следующем виде:

$$\vartheta_\varphi = \omega \cdot \exp(-\alpha \cdot z) \cdot r, \text{ при } r_B \leq r \leq r_0, \quad (25)$$

$$\vartheta_\varphi = \omega \cdot \exp(-\alpha \cdot z) \cdot \frac{r_0 \cdot (R_K - r)}{R_K - r_0}, \text{ при } R_K \geq r \geq r_0. \quad (26)$$

Таким образом, выражения (19), (20), (25) и (26) описывают поле скоростей движения вязкой среды от воздействия винтовой лопасти.

На основании полученных аналитических выражений, определяющих поле скоростей материаломелюющей загрузки в бисерной мельнице, построим графические зависимости.

Используем предложенное математическое описание для установления поля скоростей применительно к камере измельчения бисерной мельницы. Рассмотрим параметры промышленной горизонтальной бисерной мельницы БМ-5 от фирмы ООО «ПромДеталь». Мельница имеет следующие технические характеристики: объем камеры измельчения  $V_K = 5$  л; объем мелющих тел (бисера)  $V_{MT} = 3,5$  л; размер мелющих тел  $d_{MT} = 1,5 \dots 3 \times 10^{-3}$  м; мощность привода мельницы  $N_{пр} = 7,5$  кВт; число оборотов ротора  $\omega = 1440$  об/мин =  $24$  с<sup>-1</sup>; радиус помольной камеры  $R_K = 0,066$  м; радиус перемешивающих устройств в виде дисков  $r_0 = 0,055$  м; радиус вала  $r_B = 0,027$  м. Мельница применяется в производстве ЛКМ.

Для анализа полученных выражений используем вычислительный программный продукт Maple, широко применяемый в научных исследованиях [12].

Рассмотрим камеру измельчения с радиусом  $R_K = 0,066$  м с расположенной винтовой лопастью, имеющей шаг винта  $h_1 = 0,165$  м, вращающейся с числом оборотов  $\omega = 24$  с<sup>-1</sup> (вариант 1). Материаломелюющей загрузке, в виде вязкой среды, назначим следующие свойства: плотность вязкой среды  $\rho = 1684$  кг/м<sup>3</sup>, объемная доля частиц материала в вязкой среде  $C_0 = 0,3$ , коэффициент динамической вязкости чистой жидкости  $\mu_0 = 1,005$  МПа·с. Графические зависимости, построенные с использованием полученных выражений, приведены на рис. 3.

Компонента скорости  $\vartheta_r$  (рис. 3, а) при изменении координаты  $z$  в интервале  $0 \leq z \leq 0,38$  м экспоненциально убывает, а при изменении  $r$  в интервале  $0,027 \leq r \leq 0,066$  м линейно возрастает. На указанных интервалах компонента скорости  $\vartheta_{r11} = 0,04$  м/с принимает наименьшее значение при  $r = 0,027$  м и  $z = 0,38$  м и наибольшего значения  $\vartheta_{r12} = 0,62$  м/с достигает при  $r = 0,066$  м и  $z = 0$ .

Компонента скорости  $\vartheta_z$  (рис. 3, б) при изменении координаты  $z$  в интервале  $0 \leq z \leq 0,38$  м экспоненциально убывает, а при изменении  $r$  в интервале  $0,027 \leq r \leq 0,066$  м линейно возрастает. На указанных интервалах компонента скорости  $\vartheta_{z11} = 0,63$  м/с принимает наименьшее значение при  $r = 0,027$  м и  $z = 0,38$  м и наибольшее значение  $\vartheta_{z12} = 3,99$  м/с достигает при  $r = 0,066$  м и  $z = 0$ .

Компонента скорости  $\vartheta_\varphi$  (рис. 3, в) при изменении координаты  $z$  в интервале  $0 \leq z \leq 0,38$  м экспоненциально убывает, а при изменении  $r$  в интервале  $0,027 \leq r \leq 0,066$  м характер изменения функции носит нелинейный характер: сначала функция возрастает до экстремума, который возникает при

$r = r_0 = 0,055$  м, т.е. когда движущаяся среда находится как на границе винта, где и возникает наивысшая окружная скорость для винтовой лопасти. После этого компонента скорости  $\vartheta_\varphi$  стремится к 0 м/с на стенках помольной камеры.

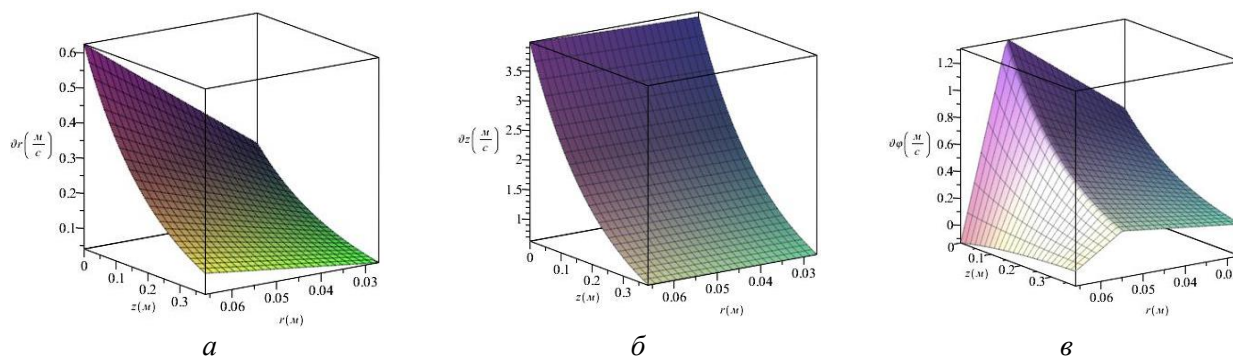


Рис. 3. Графические зависимости изменения компонентов скорости  $v_r$  (а),  $v_z$  (б),  $v_\phi$  (в) от изменения координат  $z$  и  $r$  при  $h = 0,165$  м

Рассмотрим использование винтовой лопасти с шагами  $h_2 = 0,13$  м и  $h_3 = 0,2$  м (варианты 2 и 3, соответственно). Исходя из полученных графических зависимостей (рис. 3, в; рис. 4, в; рис. 5, в), можно отметить, что на компоненту скорости  $v_\phi$  на заданном интервале изменение шага  $h$  не оказывает никакого влияния.

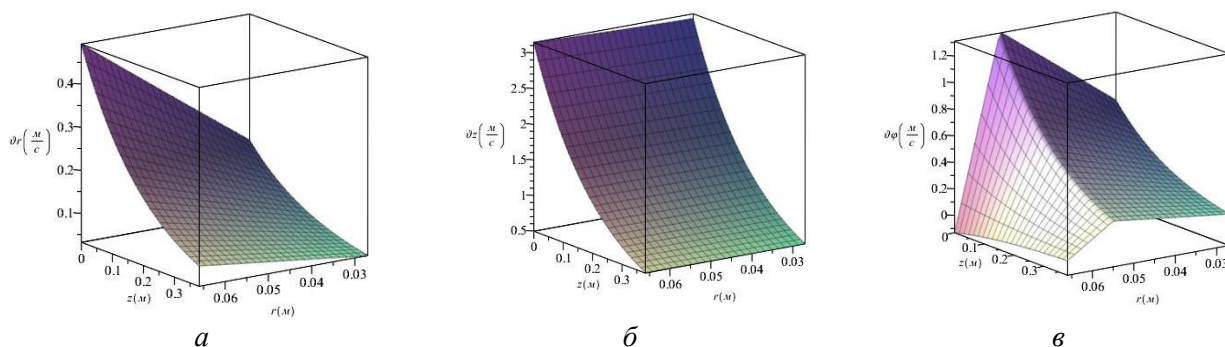


Рис. 4. Графические зависимости изменения компонентов скорости  $v_r$  (а),  $v_z$  (б),  $v_\phi$  (в) от изменения координат  $z$  и  $r$  при  $h = 0,13$  м

При шаге  $h_2 = 0,13$  м компонента скорости  $v_r$  (рис. 4, а) на ранее указанных интервалах принимает наименьшее и наибольшее значения  $v_{r21} = 0,032$  м/с и  $v_{r12} = 0,49$  м/с соответственно. При шаге  $h_3 = 0,2$  м компонента скорости  $v_r$  (рис. 5, а) принимает наименьшее и наибольшее значения:  $v_{r31} = 0,049$  м/с и  $v_{r32} = 0,75$  м/с соответственно.

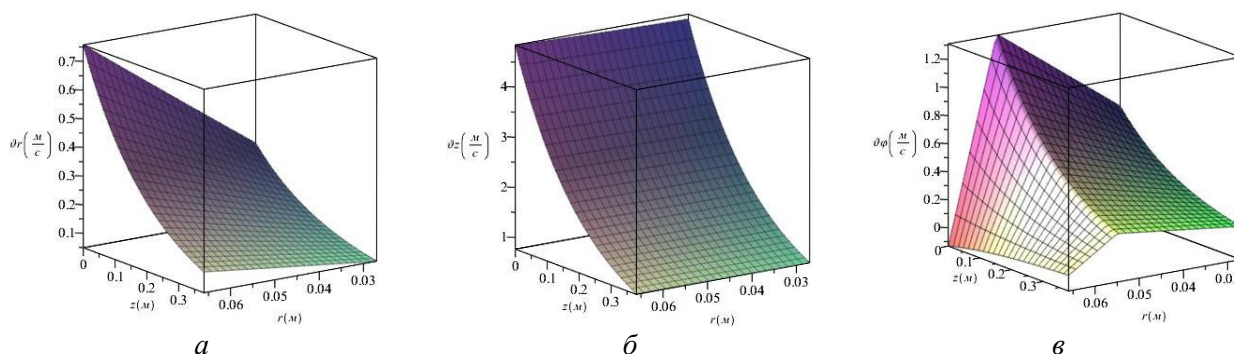


Рис. 5. Графические зависимости изменения компонентов скорости  $v_r$  (а),  $v_z$  (б),  $v_\phi$  (в) от изменения координат  $z$  и  $r$  при  $h = 0,2$  м

При использовании винтовой лопасти с шагом  $h_2 = 0,13$  м (рис.4, б) компонента скорости  $v_z$  изменяется с наименьшего  $v_{z21} = 0,49$  м/с до наибольшего значения  $v_{z22} = 3,14$  м/с на интервалах  $0 \leq z \leq 0,38$  м и  $0,027 \leq r \leq 0,066$  м. При использовании винтовой лопасти с шагом  $h_3 = 0,2$  м компонента скорости  $v_z$  (рис. 5, б) варьируется от  $v_{z31} = 0,76$  м/с до  $v_{z32} = 4,83$  м/с.

Рассмотрим изменения соотношения значений компонент скоростей для  $v_{r \min}$ ,  $v_{r \max}$ ,  $v_{z \min}$  и  $v_{z \max}$  при изменении шага винта  $h$ . В таблице первый числовой индекс у отношений  $\Delta$  значений пара-

метров для рассматриваемых вариантов указывает на вариант, значение которого в числителе рассматриваемого отношения, а второй – в знаменателе. Так, для  $\Delta\vartheta_{r1/2}$  рассматривается отношение значения радиальной компоненты скорости, полученной для первого варианта исполнения винтовой лопасти, к значению радиальной компоненты скорости, полученной для второго варианта ее исполнения.

### Значения и отношения параметров для рассмотренных вариантов

Параметр	Значение параметра для рассматриваемого варианта			Значение отношения параметров для рассмотренных вариантов, $\Delta$		
	№ 1	№ 2	№ 3	$\Delta_{3/1}$	$\Delta_{1/2}$	$\Delta_{3/2}$
$\vartheta_{r \min}$ , м/с	$\vartheta_{r1} = 0,04$	$\vartheta_{r2} = 0,032$	$\vartheta_{r3} = 0,049$	1,225	1,250	1,531
$\vartheta_{r \max}$ , м/с	$\vartheta_{r12} = 0,62$	$\vartheta_{r22} = 0,49$	$\vartheta_{r32} = 0,75$	1,210	1,265	1,530
$\vartheta_{z \min}$ , м/с	$\vartheta_{z11} = 0,63$	$\vartheta_{z21} = 0,49$	$\vartheta_{z31} = 0,76$	1,206	1,286	1,551
$\vartheta_{z \max}$ , м/с	$\vartheta_{z12} = 3,99$	$\vartheta_{z22} = 3,14$	$\vartheta_{z32} = 4,83$	1,211	1,271	1,538
$h$ , м	$h_{11} = 0,165$	$h_{12} = 0,13$	$h_{13} = 0,2$	1,212	1,269	1,538

Исходя из полученных значений, необходимо отметить, что увеличение шага винта  $h$  лопасти приводит к значительному увеличению скоростных параметров материаломелющей загрузки как в радиальном, так и в продольном направлениях. При этом значения отношений компонент скоростей достаточно близко к отношению значений шага винта  $h$  рассматриваемых вариантов исполнения лопастей. Так, отношения параметров, полученных по варианту 3 к полученным по варианту 2 для  $\vartheta_{r \min}$ ,  $\vartheta_{r \max}$ ,  $\vartheta_{z \min}$  и  $\vartheta_{z \max}$  и  $h$ , соответственно составят: 1,531, 1,530, 1,551, 1,538 и 1,538. Повышение значений скоростных параметров материаломелющей загрузки приведет к интенсификации процесса измельчения материала.

Выражения (19), (20), (25) и (26) позволяют получить математические описания абсолютной и средней скоростей движения вязкой среды от воздействия винтовой лопасти, представляющие собой предпосылки для математического описания процесса измельчения материала в корпусе бисерной мельницы с рассматриваемыми винтовыми устройствами, мощности, затрачиваемой на реализацию этого процесса и установления рациональных основных конструктивно-технологических параметров мельницы. Это является предметом дальнейших исследований.

### Выводы

1 Рассмотрены целесообразность и возможность конструктивного совершенствования распространенных в промышленности бисерных мельниц. Обоснована необходимость разработки математического описания для поиска рациональных параметров, характеризующих работу бисерной мельницы разработанной конструкции.

2 Разработан метод математического описания, и на его основе найдены компоненты вектора скорости. С использованием вычислительного пакета Maple исследовано изменение компонент поля скоростей движения материаломелющей загрузки по приведенному математическому описанию для камеры измельчения с радиусом  $R_k = 0,066$  м в продольном ( $0 \leq z \leq 0,38$  м) и радиальном ( $0,027 \leq r \leq 0,066$  м) направлениях при варьировании шага винта  $h$  лопасти. Установлено значительное влияние значений шага винта лопасти на величины продольной и радиальной компонент скорости ее движения, что характеризует возможность интенсификации процесса измельчения материала в корпусе мельницы.

3 Приведенное математическое описание поля скоростей движения материаломелющей загрузки от воздействия винтовой лопасти целесообразно использовать для математического описания абсолютной и средней скоростей ее движения, процесса измельчения материала, мощности, затрачиваемой на реализацию этого процесса и установления рациональных основных конструктивно-технологических параметров мельницы.

### Список литературы

1 Использование бисерных мельниц в фармацевтической биотехнологии / О. Запорожец, К. Р. Грининг, О. О. Губеня, Ю. С. Телечкун // Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: Материалы 17-го

### References

1 Use of bead mills in pharmaceutical biotechnology / O. Zaporozhets, K. R. Grining, O. O. Gubeny, Yu. S. Telechkun // Global economy and business administration of small and medium-sized enterprises : Proceedings of the 17th Inter-

Международного научного семинара, проводимого в рамках 19-й международной научно-технической конференции, Минск, 25–26 марта 2021 года. – Минск : Право и экономика, 2021. – С. 183–185.

2 **Ермилов, П. И.** Диспергирование пигментов: (Физико-химические основы) / П. И. Ермилов. – Москва : Химия, 1971. – 299 с.

3 A novel approach for modelling of physical interactions between slurry, grinding media and mill structure in wet stirred media mills / S. B. Larsson, B. I. Pålsson, M. Parian, P. Jonsén // Minerals. – 2021. – Vol. 11, No. 55. – DOI 10.1016/j.mineng.2019.106180.

4 **Rule, C.** IsaMill™ design improvements and operational performance at Angle Platinum, in Proceedings Metplant / C. Rule, H. De Waal // The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. – Melbourne, 2011. – P. 176–192.

5 **Baigereyev, S.** The Experimental Investigation of a New Design of Stirred Media Mill / S. Baigereyev // BULLETIN of L. N. Gumilyov ENU. Technical Science and Technology Series. – 2023. – No. 1 (142). – P. 32–43. – DOI 10.32523/2616-7263-2022-142-1-32-43.

6 A Novel Particle-Based Approach for Modeling a Wet Vertical Stirred Media Mill / S. Larsson, J. M. Rodríguez Prieto, H. Heiskari, P. Jonsén // Minerals. – 2021. – Vol. 11, No. 55. – DOI 10.3390/min11010055.

7 **Патент № 2813177 C1 Российская Федерация, МПК В02С 17/16.** Мельница-мешалка / С. И. Ханнин, Р. В. Зыбин, О. С. Мордовская; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – № 2023121803; заявл. 21.08.2023; опубл. 07.02.2024.

8 Исследование влияния многозаходных винтовых лопастей на энергетическое состояние мелющих тел в бисерной мельнице / С. И. Ханнин, Р. В. Зыбин, О. С. Мордовская, В. А. Чалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2024. – № 2. – С. 80–89. – DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-2-80-89.

9 **Жуковский, Н. Е.** Теоретическая механика / Н. Е. Жуковский. – 2-е изд. – Москва; Ленинград : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952. – 811 с.

10 **Тихонов, А. Н.** Уравнения математической физики : учебник для физико-математических специальностей / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – Москва : Издательство Московского университета; Наука, 2004. – 798 с.

national scientific seminar held within the framework of the 19th international scientific and technical conference, Minsk, March 25–26, 2021. – Minsk : Law and Economics, 2021. – P. 183–185.

2 **Ermilov, P. I.** Dispersion of pigments: (Physical and chemical principles) / P. I. Ermilov. – Moscow : Chemistry, 1971. – 299 p.

3 A novel approach for modelling of physical interactions between slurry, grinding media and mill structure in wet stirred media mills / S. B. Larsson, B. I. Pålsson, M. Parian, P. Jonsén // Minerals. – 2021. – Vol. 11, No. 55. – DOI 10.1016/j.mineng.2019.106180.

4 **Rule, C.** IsaMill™ design improvements and operational performance at Angle Platinum, in Proceedings Metplant / C. Rule, H. De Waal // The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. – Melbourne, 2011. – P. 176–192.

5 **Baigereyev, S.** The Experimental Investigation of a New Design of Stirred Media Mill / S. Baigereyev // BULLETIN of L. N. Gumilyov ENU. Technical Science and Technology Series. – 2023. – No. 1 (142). – P. 32–43. – DOI 10.32523/2616-7263-2022-142-1-32-43.

6 A Novel Particle-Based Approach for Modeling a Wet Vertical Stirred Media Mill / S. Larsson, J. M. Rodríguez Prieto, H. Heiskari, P. Jonsén // Minerals. – 2021. – Vol. 11, No. 55. – DOI 10.3390/min11010055.

7 **Patent No. 2813177 C1 Russian Federation, IPC B02C 17/16.** Mixer mill / S. I. Khanin, R. V. Zybin, O. S. Mordovskaya; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov". – No. 2023121803; declared 21.08.2023; published 07.02.2024.

8 Study of the influence of multi-start screw blades on the energy state of grinding media in a bead mill / S. I. Khanin, R. V. Zybin, O. S. Mordovskaya, V. A. Chalov // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. – 2024. – No. 2. – P. 80–89. – DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-2-80-89.

9 **Zhukovsky, N.E.** Theoretical Mechanics / N. E. Zhukovsky. – 2nd ed. – Moscow; Leningrad : State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1952. – 811 p.

10 **Tikhonov, A. N.** Equations of mathematical physics : a textbook for physicomathematical specialties / A. N. Tikhonov, A. A. Samarsky. – Moscow : Moscow University Publishing House; Nauka, 2004. – 798 p.

11 **Stender, H. H.** Einfluss von Größe und Bauart auf die Zerkleinerung in Rührwerkskugelmöhlen, Dissertation, TU Braunschweig. – 2002. – ISBN 9783736903876.

12 **Говорухин, В.** Компьютер в математическом исследовании / В. Говорухин, Б. Цибулин. – Санкт-Петербург : Питер, 2001. – 624 с.

11 **Stender, H. H.** Influence of size and design on comminution in ball mills with stirring, Dissertation, TU Braunschweig. – 2002. – ISBN 9783736903876.

12 **Govorukhin, V.** Computer in mathematical research / V. Govorukhin, B. Tsibulin. – Saint Petersburg : Piter, 2001. – 624 p.

*S. I. Khanin, R. V. Zybin, V. P. Voronov, O. S. Mordovskaya*

## DETERMINATION OF THE VELOCITY FIELD OF THE MATERIAL GRINDING LOADING IN A BEAD MILL WITH A SCREW DEVICE

**Abstract.** The use of bead mills is widespread in industrial enterprises for fine and ultrafine grinding of various multicomponent suspensions. The expediency and possibility of their constructive improvement are shown. The description of screw devices providing an increase in the efficiency of the material dispersion process in the mill body is given. The necessity of developing a mathematical description characterizing the operation of the bead mill of the developed design is substantiated in order to establish its rational parameters. A mathematical description has been developed for determining the longitudinal, radial and circumferential components of the velocity field of the material-grinding load in the body of a horizontal bead mill with screw devices. Studies have been conducted on the effect of the pitch of the blade screw on the values of the components of its speed, and patterns have been established that characterize the possibility of intensifying the grinding process.

**Keywords:** bead mill, mathematical description, velocity field, rotation frequency, grinding.

**For citation:** Determination of the velocity field of the material grinding loading in a bead mill with a screw device / S. I. Khanin, R. V. Zybin, V. P. Voronov, O. S. Mordovskaya // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 209–218. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_209.

### Сведения об авторах

#### **Ханин Сергей Иванович**

Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова), кафедра механического оборудования, доктор технических наук, профессор, e-mail: sergiykhani@gmail.com

#### **Зыбин Роман Владимирович**

Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова), кафедра механического оборудования, аспирант, e-mail: zybin.roman97@yandex.ru

#### **Воронов Виталий Павлович**

Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова), кафедра механического оборудования, кандидат физико-математических наук, профессор, e-mail: v.p.voronov2018@gmail.com

#### **Мордовская Ольга Сергеевна**

Белгородский государственный национальный исследовательский

### Information about the authors

#### **Khanin Sergey Ivanovich**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov), Chair of Mechanical Equipment, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: sergiykhani@gmail.com

#### **Zybin Roman Vladimirovich**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov), Chair of Mechanical Equipment, Postgraduate Student, e-mail: zybin.roman97@yandex.ru

#### **Voronov Vitaly Pavlovich**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov), Chair of Mechanical Equipment, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Professor, e-mail: v.p.voronov2018@gmail.com

#### **Mordovskaya Olga Sergeevna**

Belgorod State National Research University named after V. G. Shukhov

университет» (НИУ «БелГУ»),  
кафедра прикладной информатики и  
информационных технологий,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: unique.ox@gmail.com

(BSTU named after V. G. Shukhov),  
Chair of Applied Informatics and Information  
Technologies,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: unique.ox@gmail.com

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 656.2 : 519.85

DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_219

*А. Т. Осьминин, А. Н. Баушев, Л. А. Осьминин***МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ПАРЕТО-ОПТИМАЛЬНЫХ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СХЕМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВАГОНОВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ НОРМИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПАРКА**

**Аннотация.** Предложен двухэтапный подход к нормированию рабочего парка грузовых вагонов компаний-операторов в условиях нестационарного перевозочного процесса. На первом этапе для фиксированного интервала планирования формируется множество допустимых парето-оптимальных логистических схем в ориентированном графе перевозок по аддитивным эксплуатационным критериям: времени оборота, порожнему пробегу, переменным эксплуатационным затратам и другим технологическим показателям. Показано, что тарифный или доходный результат схемы имеет неаддитивный характер и потому должен оцениваться после построения полного пути, а не как сумма значений по отдельным дугам. На втором этапе решается задача минимизации требуемого рабочего парка на скользящем горизонте планирования с учетом объемов заявок по периодам и при необходимости межпериодного баланса расположения вагонов. Формула Литтла используется только как локальная агрегированная оценка для отдельной схемы и не рассматривается как прямой расчетный инструмент для неоднородной и нестационарной сети. Приведен иллюстративный пример, демонстрирующий связь этапа генерации схем и этапа нормирования парка.

**Ключевые слова:** железнодорожные перевозки, рабочий парк вагонов, логистическая схема, многокритериальная оптимизация, парето-оптимальность, порожний пробег, скользящий горизонт планирования, линейное программирование.

**Для цитирования:** Осьминин, А. Т. Метод построения парето-оптимальных логистических схем перемещения вагонов и его применение для нормирования рабочего парка / А. Т. Осьминин, А. Н. Баушев, Л. А. Осьминин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 219–225. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_219.

**Введение**

Нормирование рабочего парка грузовых вагонов относится к числу базовых задач управления перевозочным процессом, поскольку именно оно определяет потребность в подвижном составе, устойчивость выполнения плана перевозок, уровень обслуживания клиентов и экономическую эффективность работы компаний-операторов. В условиях роста грузонапряженности сети и неоднородности логистических маршрутов эта задача перестает быть только расчетом среднего оборота вагона и превращается в задачу выбора рациональных схем его обращения на сети.

В практических расчетах размер рабочего парка нередко связывают с соотношением Литтла  $L = \lambda W$  [1, 2]. Однако для открытой железнодорожной системы, в которой одновременно действуют сезонные колебания спроса, технологические «окна», ограничения пропускной и перерабатывающей способности, неоднородность маршрутов и управленческие решения различных операторов, прямое использование этой формулы в агрегированном виде носит лишь ориентировочный характер. В настоящей статье формула Литтла рассматривается не как основная модель расчета, а как локальная интерпретация для отдельной логистической схемы: требуемый парк пропорционален интенсивности перевозок и времени оборота, которое должно быть получено из явной схемы обращения вагона.

Существенное влияние на оборот вагона оказывают факторы, которые в укрупненном виде обычно перечисляются во введении, но редко доводятся до формальной модели: сезонность и неравномерность заявок, технологические окна, варианты переработки вагонов, ограничения инфраструктуры, коммерческие правила оформления перевозки, а также различие интересов перевозчика и оператора. В предлагаемой постановке эти факторы учитываются через разбиение горизонта планирования на интервалы, формирование для каждого интервала собственного множества допустимых дуг графа, задание аддитивных эксплуатационных критериев и последующую схемную оценку коммерческого результата.

Отдельного учета требует противоречие между интересами компании-оператора и перевозчика. Оператор стремится к максимизации доходности схемы и снижению собственных затрат, тогда

как для перевозчика критически важны порожний пробег, загрузка инфраструктуры, баланс вагонов по узлам сети и устойчивость эксплуатационной работы. Поэтому множество рассматриваемых логистических схем должно формироваться по нескольким критериям одновременно, а порожний пробег должен выступать не побочным, а явным показателем качества схемы.

Математически задача построения логистических схем естественно формулируется на графовой модели транспортной сети и относится к классу задач многокритериальной оптимизации и поиска путей в графах [3–6]. В статье предлагается двухэтапный метод: на первом этапе строится множество допустимых парето-оптимальных схем обращения вагона по аддитивным технологическим критериям, на втором этапе это множество используется как набор допустимых колонок в задаче нормирования рабочего парка на скользящем горизонте планирования.

### ***Цель научной разработки***

Целью научной разработки является обоснование и разработка математико-алгоритмического подхода к нормированию рабочего парка вагонов компаний-операторов на основе построения множества допустимых парето-оптимальных логистических схем обращения вагонов и последующего оптимального выбора их комбинаций при заданном плане перевозок и изменении спроса во времени.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) формализовать представление логистических схем в виде путей в ориентированном графе перевозок на последовательности плановых интервалов;
- 2) разделить аддитивные эксплуатационные критерии схемы и неаддитивный схемный коммерческий результат;
- 3) сформулировать задачу построения множества допустимых парето-оптимальных путей при пороговых ограничениях;
- 4) описать алгоритм BS&F (breadth-search + filtration) и показать его корректную роль на этапе генерации схем;
- 5) сформулировать оптимизационную модель нормирования рабочего парка на скользящем горизонте планирования и связать ее коэффициенты со структурой найденных схем;
- 6) показать на небольшом примере, как критерий порожнего пробега позволяет согласовывать интересы оператора и перевозчика.

### ***Формализация логистической схемы и многокритериальной постановки***

Пусть горизонт планирования разбит на интервалы  $\tau = 1, \dots, N$ . Для каждого интервала  $\tau$  задается ориентированный граф  $G_\tau = (V, A_\tau)$ , где  $V$  – множество узлов сети (станций, узлов формирования, районов выгрузки и т.п.), а  $A_\tau$  – множество допустимых на данном интервале перемещений вагона. Изменение множества дуг  $A_\tau$  по интервалам отражает влияние сезонности, технологических «окон», ограничений инфраструктуры, временных запретов, альтернатив переработки и иных возмущений перевозочного процесса.

Для каждой дуги  $a \in A_\tau$  задается набор аддитивных эксплуатационных критериев  $c_1(a), c_2(a), \dots, c_m(a)$ . В прикладных расчетах в качестве таких критериев могут использоваться время следования и переработки, порожний пробег, переменные эксплуатационные затраты, штраф за технологический риск, число переработок и другие показатели, суммируемые по мере последовательного прохождения дуг. Важно подчеркнуть, что тарифный или доходный результат перевозки в общем случае не является аддитивным по дугам графа, поэтому далее аддитивность относится только к эксплуатационным критериям схемы.

Аддитивность эксплуатационных критериев для конкатенации двух путей записывается в виде (1):

$$c_k(p_1 \cdot p_2) = c_k(p_1) + c_k(p_2), \quad k = 1, \dots, m. \quad (1)$$

После построения полного пути  $p$  его схемный коммерческий результат  $R(p)$  – доход, маржинальный эффект или укрупненная тарифная оценка – вычисляется отдельно для всей схемы в целом. Такой прием позволяет устранить методическую коллизию, связанную с тем, что тариф на перевозку по сформированному пути не обязан равняться сумме тарифов по отдельным участкам.

Для фиксированных начальной вершины  $s \in V$  и конечной вершины  $t \in V$  через  $P_\tau(s, t)$  обозначим множество всех путей в графе  $G_\tau$ , начинающихся в  $s$  и заканчивающихся в  $t$ . Допустимым будем считать путь, удовлетворяющий заданным пороговым ограничениям по технологическим критериям, например по времени оборота и порожнему пробегу. Тогда множество допустимых путей записывается в виде (2):

$$P_{\tau\_adm}(s, t) = \{ p \in P_\tau(s, t) : c_k(p) \leq T_k, \quad k \in K\_lim \}. \quad (2)$$

Для путей из множества  $P_{\tau\_adm}(s, t)$  вводится обычное отношение парето-доминирования: путь  $p$  доминирует путь  $q$ , если он не хуже  $q$  по всем учитываемым аддитивным критериям и строго лучше хотя бы по одному из них. Формально это записывается соотношением (3):

$$p < q \Leftrightarrow c_k(p) \leq c_k(q) \quad (k = 1, \dots, m), \text{ и существует } \ell: c_\ell(p) < c_\ell(q). \quad (3)$$

Подмножеством парето-оптимальных допустимых путей  $P^*\tau(s, t)$  будем считать множество всех путей из  $P_{\tau\_adm}(s, t)$ , не доминируемых никаким другим допустимым путем. Именно это множество служит входом для последующего этапа нормирования рабочего парка.

Связь с формулой Литтла в предлагаемой постановке становится явной на уровне отдельной схемы  $j$ . Если на интервале  $\tau$  поток заявок, обслуживаемых данной схемой, имеет интенсивность  $\lambda_j\tau$ , а среднее время оборота по этой схеме равно  $W_j\tau$ , то локальная агрегированная оценка требуемого парка задается соотношением (4):

$$N_j\tau^{\wedge}(L) \approx \lambda_j\tau \cdot W_j\tau, \quad W_j\tau = c_1(p_j). \quad (4)$$

Следовательно, формула Литтла в данной работе не «исчезает», а используется как интерпретационный мост между построенной логистической схемой  $p_j$  и требуемым числом вагонов. Новизна подхода состоит в том, что величина  $W_j\tau$  не задается априори усредненным нормативом по системе, а вычисляется из явно сформированной схемы обращения вагона для конкретного интервала планирования.

#### **Алгоритм BS&F построения множества парето-оптимальных схем**

Прямая генерация всех путей в графе  $G_\tau$  неприемлема даже для умеренных размеров сети из-за комбинаторного взрыва. Поэтому применяется процедура поэтапного расширения частичных путей с одновременным удалением заведомо неэффективных альтернатив. Алгоритм BS&F (breadth-search + filtration) сочетает послойное расширение путей и фильтрацию доминируемых меток, что соответствует классу labeling-алгоритмов для задач многокритериальных путей [3, 6–8].

Для каждой вершины  $v \in V$  поддерживается множество меток  $L(v)$ . Метка соответствует некоторому допустимому пути из  $s$  в  $v$  и хранит вектор аддитивных критериев  $(c_1, \dots, c_m)$ . При расширении метки вдоль дуги  $a = (v, u)$  формируется новая метка с покомпонентно увеличенными значениями критериев. Если новая метка нарушает хотя бы одно пороговое ограничение из множества  $K\_lim$ , она отбрасывается. В противном случае выполняется ее включение в  $L(u)$  и последующая фильтрация по доминированию.

Псевдокод алгоритма BS&F приведен ниже.

Вход: граф  $G_\tau = (V, A_\tau)$ , начальная вершина  $s$ , конечная вершина  $t$ , пороги  $T\_k$   
 Выход: множество меток  $L(t)$  – оценки парето-оптимальных допустимых путей

```

для всех  $v \in V$ :  $L(v) \leftarrow \emptyset$ 
 $L(s) \leftarrow \{(0, \dots, 0)\}$ 
 $Q \leftarrow$  очередь вершин; поместить  $s$  в  $Q$ 

пока  $Q$  не пуста:
   $v \leftarrow$  извлечь из  $Q$ 
  для каждой дуги  $a = (v, u) \in A_\tau$ :
    для каждой метки  $\ell \in L(v)$ :
       $\ell' \leftarrow \ell + c(a)$ 
      если  $\ell'$  нарушает хотя бы одно ограничение: продолжить
       $L(u) \leftarrow \text{FILTR}(L(u) \cup \{\ell'\})$ 
      если  $L(u)$  изменилось: поместить  $u$  в  $Q$ 

для каждой конечной метки в  $L(t)$ :
  восстановить полный путь  $p$ 
  вычислить схемный коммерческий результат  $R(p)$ 
  удалить путь, если он нарушает коммерческие правила или  $R(p) < R\_min$ 

вернуть множество недоминируемых схем
  
```

Ключевым обстоятельством является то, что процедура фильтрации удаляет только доминируемые альтернативы, а потому не может отбросить путь, принадлежащий множеству  $P^*\tau(s, t)$ . В то же

время учет коммерческого результата  $R(p)$  вынесен за пределы операции дугового сложения: он определяется после восстановления полного пути, что методически корректно при неаддитивном характере тарифа и дохода. Тем самым алгоритм BS&F решает именно ту часть задачи, где применимы аддитивные критерии, а коммерческая оценка выполняется на уровне готовой схемы.

В худшем случае число парето-оптимальных путей может расти экспоненциально с размером графа и числом критериев. Поэтому область эффективного применения алгоритма ограничивается небольшим количеством критериев и разумно выбранными порогами. Для задач нормирования рабочего парка – это условие обычно выполняется: на практике достаточно учитывать 2–4 ключевых технологических критерия, среди которых время оборота и порожний пробег являются обязательными.

#### **Оптимизационная модель нормирования рабочего парка**

Пусть для каждого интервала  $\tau$  построено множество схем  $J_\tau = \{p_1, p_2, \dots, p_{J_\tau}\}$ . Каждая схема  $j \in J_\tau$  является конкретным путем в графе  $G_\tau$  и потому однозначно задает свои технологические показатели, коммерческий результат и структуру выполняемых перевозочных операций. Обозначим через  $x_{j\tau}$  количество вагонов, направляемых по схеме  $j$  на интервале  $\tau$ . Через  $a_{ij\tau}$  обозначим число перевозок типа  $i$ , которое способен выполнить один вагон при реализации схемы  $j$  на интервале  $\tau$ , а через  $Q_{i\tau}$  – требуемый объем перевозок данного типа.

Тогда базовая задача нормирования рабочего парка на скользящем горизонте планирования может быть записана в форме (5).

$$\min \sum_{\tau} \sum_j x_{j\tau} \quad \text{при условиях} \quad \sum_j a_{ij\tau} x_{j\tau} \geq Q_{i\tau}, \quad i = 1, \dots, I; \quad \tau = 1, \dots, H; \quad x_{j\tau} \in Z_+. \quad (5)$$

Именно коэффициенты  $a_{ij\tau}$  формируются по найденным логистическим схемам, поэтому модель (5) не является отдельной постановкой, не связанной с этапом построения маршрутов. Напротив, она представляет второй этап единого метода: на первом этапе генерируются допустимые парето-схемы, на втором этапе выбирается их комбинация, минимизирующая требуемый рабочий парк при покрытии заданного плана перевозок.

Если необходимо явно учитывать динамику расположения вагонов между интервалами, вводятся межпериодные балансовые ограничения по узлам сети. Обозначим через  $n_{v\tau}$  число вагонов, доступных в узле  $v$  в начале интервала  $\tau$ , а через  $b_{vj\tau}$  – чистое изменение числа вагонов в узле  $v$  при выполнении одной схемы  $j$  на данном интервале. Тогда межпериодный баланс записывается соотношением (6)

$$n_{v,\tau+1} = n_{v,\tau} + \sum_j b_{vj\tau} x_{j\tau}, \quad v \in V, \quad \tau = 1, \dots, H-1. \quad (6)$$

Модель (6) показывает, что колебания объемов заявок во времени действительно переводят задачу в динамическую постановку. Однопериодная схема расчета является лишь частным случаем при  $H = 1$ . На практике возможно применение метода скользящего горизонта: для каждого нового интервала заново формируется граф  $G_\tau$ , пересчитывается множество допустимых схем  $J_\tau$  и затем решается задача (5) с учетом имеющихся межпериодных запасов вагонов.

Согласование интересов оператора и перевозчика осуществляется за счет состава критериев и ограничений. Например, порожний пробег может быть включен в критерийную векторную оценку схем, в жесткие пороговые ограничения или в дополнительную цель отбора схем. Это позволяет исключать коммерчески приемлемые, но нерациональные с точки зрения маршрутов продвижения варианты, ухудшающие эксплуатационные показатели перевозчика.

Отдельный аспект связан с неопределенностью времен следования и параметров перевозочного процесса. Строгий учет такой неопределенности может выполняться методами стохастического программирования и робастной оптимизации [9–14]. В настоящей статье рассмотрена детерминированная базовая постановка; при необходимости стохастические эффекты могут быть отражены через сценарный набор графов  $G_\tau$  или через консервативные пороги  $T_k$ .

#### **Иллюстративный пример**

Для демонстрации логики метода рассмотрим упрощенный пример, в котором для обращения вагона между узлами  $A$  и  $C$  на месячном интервале сформированы три допустимые схемы (таблица). Для всех схем коммерческий результат  $R(p)$  вычисляется после построения полного пути; при этом по аддитивным критериям учитываются время оборота, порожний пробег и переменные эксплуатационные затраты.

Схема	Последовательность узлов	Время оборота, сут.	Порожний пробег, км	Переменные затраты, усл. ед.	Статус
S1	A-B-C-A	4,2	118	1,00	парето-оптимальна
S2	A-D-C-A	3,8	162	1,07	парето-оптимальна
S3	A-B-D-C-A	5,1	190	1,12	доминируется

В приведенном примере схема S3 проигрывает двум другим альтернативам по всем технологическим показателям и поэтому исключается уже на этапе фильтрации. Для месячного объема перевозок 120 повагонных отправок локальная оценка по формуле (4) дает примерно  $120 \cdot 4,2/30 \approx 17$  вагонов для схемы S1 и  $120 \cdot 3,8/30 \approx 16$  вагонов для схемы S2. Если для перевозчика установлен предел порожнего пробега 150 км, в допустимом множестве остается только схема S1; если предел увеличен до 170 км, в мастер-задачу (5) поступают обе схемы S1 и S2, и далее выбор зависит от дополнительных коммерческих и технологических ограничений. Тем самым пример наглядно показывает, каким образом первый этап метода формирует набор допустимых колонок для второго этапа нормирования парка.

### Выводы

1 Показано, что формула Литтла применима в рассматриваемой задаче только как локальная агрегированная оценка для отдельной схемы или однородного класса схем. В качестве прямой глобальной модели для неоднородной и нестационарной железнодорожной сети она недостаточна.

2 Предложено формализовать сложность управления вагонным парком через интервально зависимую графовую модель  $G\tau = (V, A\tau)$ , в которой сезонность, технологические окна, ограничения инфраструктуры и иные возмущения отражаются изменением множества допустимых дуг и их параметров.

3 Уточнено, что свойство аддитивности относится только к эксплуатационным критериям схемы – времени, порожнему пробегу, переменным затратам и т. п. Тарифный или доходный результат схемы должен вычисляться после построения полного пути, а не суммироваться по отдельным участкам.

4 Описан алгоритм BS&F, обеспечивающий построение множества допустимых парето-оптимальных схем и фильтрацию доминируемых альтернатив. Это позволяет формировать управляемое по объему множество кандидатов для последующего расчета.

5 Показана логическая связь между этапом построения схем и этапом нормирования рабочего парка: найденные парето-оптимальные схемы выступают допустимыми колонками в задаче целочисленного программирования на скользящем горизонте планирования.

6 Введение порожнего пробега в состав критериев и ограничений позволяет формализованно согласовывать интересы оператора и перевозчика. Небольшой иллюстративный пример демонстрирует практическую работоспособность предложенного подхода.

### Список литературы/References

- 1 Little, J. D. C. A Proof for the Queuing Formula  $L = \lambda W / J$ . D. C. Little // Operations Research. – 1961. – Vol. 9 (3). – P. 383–387. – DOI 10.1287/opre.9.3.383.
- 2 Fundamentals of Queueing Theory / D. Gross, J. F. Shortle, J. M. Thompson, C. M. Harris. – 4th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2008. – 528 p. – ISBN 978-0-471-79127-0.
- 3 Ehrgott, M. Multicriteria Optimization / M. Ehrgott. – Berlin : Springer-Verlag, 2005. – 323 p. – ISBN 3-540-21398-8.
- 4 A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II / K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2002. – Vol. 6 (2). – P. 182–197. – DOI 10.1109/4235.996017.
- 5 Dijkstra, E. W. A note on two problems in connexion with graphs / E. W. Dijkstra // Numerische Mathematik. – 1959. – Vol. 1. – P. 269–271. – DOI 10.1007/BF01386390.
- 6 Introduction to Algorithms / T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein. – 3rd ed. – Cambridge, MA : MIT Press, 2009. – 1292 p. – ISBN 978-0-26253-305-8.
- 7 Preparata, F. P. Computational Geometry: An Introduction / F. P. Preparata, M. I. Shamos. – New York : Springer-Verlag, 1985. – 390 p. – ISBN 0-387-96131-3.

8 Algorithms and methods for solving scheduling problems and other extremum problems on large-scale graphs / S. V. Chernyshev, E. A. Cherepanov, E. V. Pankratiev, A. M. Chepovskii // Journal of Mathematical Sciences. – 2005. – Vol. 128 (6). – P. 3487–3495.

9 **Birge, J. R.** Introduction to Stochastic Programming / J. R. Birge, F. Louveaux. – New York : Springer, 2011. – 485 p.

10 **Shapiro, A.** Lectures on Stochastic Programming : Modeling and Theory / A. Shapiro, D. Dentcheva, A. Ruszczyński. – Philadelphia : SIAM, 2009. – DOI 10.1137/1.9780898718751.

11 Applications of Stochastic Programming / S. W. Wallace, W. T. Ziemba (eds.). – Philadelphia : SIAM, 2005. – 709 p. – ISBN 978-0-89871-555-2.

12 **King, A. J.** Modeling with Stochastic Programming / A. J. King, S. W. Wallace. – New York : Springer, 2012. – DOI 10.1007/978-0-387-87817-1.

13 **Ben-Tal, A.** Robust Optimization / A. Ben-Tal, L. El Ghaoui, A. Nemirovski. – Princeton, NJ : Princeton University Press, 2009. – 576 p. – ISBN 978-0-691-14368-2.

14 **Kall, P.** Stochastic Programming / P. Kall, S. W. Wallace. – Chichester : John Wiley & Sons, 1994. – 307 p. – ISBN 978-0-471-95108-7.

15 **Martello, S.** Knapsack Problems : Algorithms and Computer Implementations / S. Martello, P. Toth. – Chichester: John Wiley & Sons ; 1990. – ISBN 978-0-471-92420-3.

*A. T. Osminin, A. N. Baushev, L. A. Osminin*

#### A METHOD FOR CONSTRUCTING PARETO-OPTIMAL LOGISTIC SCHEMES FOR CAR MOVEMENT AND ITS APPLICATION FOR STANDARDIZATION OF THE WORKING FLEET

**Abstract.** The paper proposes a two-stage approach to norming the working fleet of freight cars of operating companies under nonstationary traffic conditions. At the first stage, for a fixed planning interval, the set of feasible Pareto-optimal logistic schemes is generated in a directed transportation graph using additive operational criteria such as turnaround time, empty mileage, variable operating costs and other technological indicators. It is shown that the tariff or revenue effect of the scheme is non-additive and therefore has to be evaluated after constructing the complete route, rather than as the sum of the values for individual arcs. At the second stage, a rolling-horizon optimization model is solved to minimize the required working fleet while satisfying period-by-period transportation demand and, if needed, inter-period wagon-balance constraints. Little's formula is used only as a local aggregate estimate for an individual scheme and not as a direct computational model for a heterogeneous nonstationary rail network. A small illustrative example is provided to demonstrate the logical link between the scheme-generation stage and the fleet standardization stage.

**Keywords:** rail freight transportation, working railcar fleet, logistic scheme, multi-criteria optimization, Pareto optimality, empty mileage, rolling horizon planning, linear programming.

**For citation:** Osminin, A. T. A method for constructing Pareto-optimal logistic schemes for car movement and its application for standardization of the working fleet / A. T. Osminin, A. N. Baushev, L. A. Osminin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 219–225. – DOI 10.46973/0201-727X\_2026\_1\_219.

#### Сведения об авторах

**Осьминин Александр Трофимович**  
Петербургский государственный  
университет путей сообщения Императора  
Александра I (ПГУПС),  
кафедра «Управление эксплуатационной  
работой»,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: at@osminin.com

#### Information about the authors

**Osminin Aleksandr Trofimovich**  
Emperor Alexander I Saint Petersburg  
State Transport University (PSTU),  
Chair “Operational Management”,  
Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
e-mail: at@osminin.com

**Баушев Алексей Николаевич**

Петербургский государственный  
университет путей сообщения Императора  
Александра I (ПГУПС),  
кафедра «Управление эксплуатационной  
работой»,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент, научный сотрудник,  
e-mail: banban2008@yandex.ru

**Осьминин Леонид Александрович**

Петербургский государственный  
университет путей сообщения Императора  
Александра I (ПГУПС),  
кафедра «Управление эксплуатационной  
работой»,  
кандидат технических наук,  
научный сотрудник,  
e-mail: leonid@osminin.com

**Baushev Aleksey Nikolaevich**

Emperor Alexander I Saint Petersburg  
State Transport University (PSTU),  
Chair “Operational Management”,  
Candidate of Physical and Mathematical  
Sciences, Associate Professor,  
Research Fellow,  
e-mail: banban2008@yandex.ru

**Osminin Leonid Aleksandrovich**

Emperor Alexander I Saint Petersburg  
State Transport University (PSTU),  
Chair “Operational Management”,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Researcher,  
e-mail: leonid@osminin.com

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК РГУПС»

**1** **Материалы статей** представляют в виде текстов, отформатированных и распечатанных на лазерном или струйном принтере (пригодных для сканирования) на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) в одном экземпляре. Рекомендуемый объем статьи – 5–15 страниц.

Одновременно представляют электронную версию статьи, выполненной в текстовом редакторе Word for Windows, шрифт Times New Roman, 11 pt, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание по ширине, абзацный отступ – 1,25 см, все поля – 2 см.

**2** На первой странице должны быть указаны:

- **УДК** – в левом верхнем углу;
- интервал;
- **инициалы и фамилии авторов** – по центру, курсивом;
- интервал;
- **название статьи** – заглавными буквами, полужирным шрифтом, по центру, без переносов;
- интервал;
- **аннотация** (80–150 слов);
- **ключевые слова** (5–10 слов);
- интервал;
- **текст статьи** – печатается с переносами.
- интервал;
- **список литературы** на русском и английском языках (не менее 10 источников).

**3** **Статья** должна содержать вводную часть, цель научной разработки, основную часть и выводы. Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и готов для макетирования и верстки журнала на компьютере.

**4** **Буквы** латинского алфавита набирают курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом. Математические символы  $\lim$ ,  $\ln$ ,  $\arg$ ,  $\text{const}$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\min$ ,  $\max$  и т.д. набирают прямым шрифтом. Аббревиатуры следует расшифровывать при их первом упоминании в тексте.

**5** **Формулы.** Большие формулы необходимо разбить на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при работе в формульном редакторе каждая строка – отдельный объект). Располагать формулы следует по центру строки.

Буквы J и I, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (ноль) должны различаться по начертанию.

Тире, дефис, знак «минус» обозначают соответствующими знаками. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Номер формулы следует печатать в Word отдельно от формул, в круглых скобках по правому краю.

Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим ГОСТам.

**6** **Рисунки и фотографии**, выполненные четко и контрастно в формате \*.tif, \*.jpg, \*.png, с разрешением не менее 300 точек на дюйм, следует размещать в порядке их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки в тексте и подрисовочная подпись обязательны.

**7** **Таблицы** следует размещать по мере упоминания в статье. Ссылки на таблицы в тексте и названия таблиц обязательны.

**8** **Список литературы** приводят общим списком в конце статьи и составляют в соответствии с последовательностью ссылок в тексте, которые обозначают арабскими цифрами в квадратных скобках. Литературу оформляют только согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018. При наличии у статьи цифрового идентификатора объекта (DOI) его указание обязательно.

Статья должна быть обязательно подписана всеми авторами.

**9** **Материалы, прилагаемые к статье**, должны содержать следующие сведения (на русском и английском языках):

- Название статьи (заглавными буквами, полужирным шрифтом).
- Фамилия, имя, отчество автора (полностью, без сокращений).
- Место работы каждого автора в именительном падеже.
- Ученая степень, ученое звание, должность.
- E-mail.
- Аннотация (краткое содержание статьи, включающее 3–4 предложения).
- Ключевые слова.

**Условия и порядок публикации статей в журнале**

- 1** Статья должна быть оформлена по прилагаемым требованиям.
- 2** Автор имеет право опубликовать в номере одну статью.
- 3** Автор может прислать статью в адрес редакции:
  - по почте;
  - по электронной почте;
  - принести в редакцию и передать ответственному секретарю (гл. корпус, ком. Д 107).
- 4** Статья, представляемая в редакцию, должна соответствовать тематике издания.

Тематика журнала охватывает основные проблемы транспорта, а также энергетики, машиностроения и управления. Публикуются статьи по следующим секциям:

- машиностроение;
- подвижной состав, безопасность движения и экология;
- информационные технологии, автоматика и телекоммуникации;
- управление и логистика на транспорте;
- железнодорожный путь и транспортное строительство;
- транспортная энергетика;
- моделирование систем и процессов.

- 5** Редакционная коллегия принимает для публикации статьи после тщательной научной экспертизы.

Для публикации отбирают статьи, которые представляют научный интерес и являются новой ступенью в разработке данной проблемы. Статьи публицистического плана не принимаются.

- 6** На заседании редколлегии принимают решение о возможности публикации статьи только при наличии положительной рецензии.

- 7** Все расходы по подготовке к публикации и изданию журнала оплачивает университет, в том числе и почтовые расходы при пересылке журнала авторам.

**Краткая информация о журнале**

Научно-технический журнал «Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения» («Вестник РГУПС») зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-77245 от 20 ноября 2019 г. Журнал имеет международный стандартный сериальный номер (ISSN 0201-727X), присвоенный Книжной палатой Российской Федерации.

Учредителем и издателем является Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Главный редактор журнала – академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор В. И. Колесников.

В состав редакционной коллегии входят ведущие ученые РГУПС, а также других транспортных и академических университетов Северо-Кавказского региона, Москвы, Санкт-Петербурга, Республики Беларусь, Чешской Республики, Польши, Франции.

Журнал выходит с периодичностью 4 номера в год, т.е. каждый квартал.

С апреля 2004 года «Вестник РГУПС» включен в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук» (решение Президиума ВАК № 6/4 от 06.02.2004 г.). Журнал вошел во все последующие редакции Перечня.

«Вестник РГУПС» – подписное издание. С 2004 года журнал был включен в каталог подписных изданий агентства «Роспечать». Также включен в каталог подписных изданий Объединённого каталога «Пресса России» ([www.pressa-rg.ru](http://www.pressa-rg.ru) под индексом 53720).

Подписаться на журнал можно через агентство подписки «Урал-Пресс» и агентство «АРЗИ», распространяется журнал на территории Российской Федерации. Подписку можно оформить на квартал, на полгода или на год.

Журнал «Вестник РГУПС» бесплатно рассылается всем отраслевым вузам, в ряд вузов Министерства образования и науки России, центральным и зональным научно-техническим библиотекам, НИИ информации.

**Почтовый адрес редакции:**

3344038, Ростовская область, г. о. город Ростов-на-Дону,  
г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2.  
Ростовский государственный университет путей сообщения.  
Редакция журнала «Вестник РГУПС».  
Телефон: +7 (863) 272-62-74. Факс: +7 (863) 255-37-85.  
E-mail: [pmv\\_nis@rgups.ru](mailto:pmv_nis@rgups.ru); [nis@rgups.ru](mailto:nis@rgups.ru) (дополнительный).

Архив журнала и требования по оформлению статей размещены на сайте <http://vestnik.rgups.ru>.

*Научное издание*

**ВЕСТНИК  
Ростовского государственного университета  
путей сообщения**

Научно-технический журнал

**№ 1 (101)  
2026**

**Уважаемые читатели!**

**Вы можете подписаться на наш журнал на сайте [www.pressa-rg.ru](http://www.pressa-rg.ru).  
Индекс журнала по каталогу 53720**

**Полнотекстовая версия статей находится в открытом доступе на сайтах:  
Российской научной электронной библиотеки: <https://www.elibrary.ru/>  
Научной электронной библиотеки «КиберЛенинка» <https://cyberleninka.ru/>  
Национальной платформы периодических научных изданий (РЦНИ) <https://journals.rcsi.science>  
Журнал обрабатывается в системах индексов научного цитирования  
РИНЦ и Science Index**

**Требования к оформлению статей размещены на сайте  
<http://vestnik.rgups.ru>**

Редакторы: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,  
Т.И. Исаева, Т.М. Чеснокова,  
А.Н. Колесниченко (английский текст)

Корректоры: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,  
Т.И. Исаева, Т.М. Чеснокова,  
А.Н. Колесниченко (английский текст)

Оригинал-макет журнала подготовлен А.О. Куделиной

---

Подписано в печать 30.03.2026.  
Дата выхода в свет 31.03.2026.  
Печать офсетная.  
Знак информационной продукции 16+.

Формат 60×84/8.  
Усл. печ. л. 26,5.  
Тираж 510 экз.  
Цена свободная.

Бумага офсетная.  
Изд. № 12.  
Заказ .

---

**Учредитель :**

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

**Адрес университета, издателя, редакции:  
344038, Ростовская область, г. о. город Ростов-на-Дону,  
г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка  
Народного Ополчения, зд. 2.  
Телефон редакции +7 (863) 272-62-74; факс +7 (863) 255-37-85.  
E-mail: [pmv\\_nis@sci.rgups.ru](mailto:pmv_nis@sci.rgups.ru); [nis@rgups.ru](mailto:nis@rgups.ru)**

**Адрес типографии :  
«Издательство «D&V». Св-во № 003679887.  
344037, г. Ростов-на-Дону, ул. 20 линия, 54.  
E-mail: [divprint@mail.ru](mailto:divprint@mail.ru). Телефон +7 (918) 543-75-63.**